

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ELEKTRİKSEL OLARAK İLETKEN, OPTİK OLARAK GEÇİRGEN YAPI
TASARIMI**

İlker GÜNAY

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİKSEL OLARAK İLETKEN, OPTİK OLARAK GEÇİRGEN YAPI TASARIMI

İlker GÜNAY

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ

Görüntüleme sistemleri zorlu çevre koşullarında daha fazla platformda kullanılmaktadır. Günümüzde yoğun talep gören insansız sistemlerin vazgeçilmez bir parçasıdır. Görünür dalga boyundan kızılötesi dalga boyuna kadar pek çok uygulama alanı bulunan bu sistemlerin en büyük dezavantajlarından birisi optik pencereleri nedeniyle çevresel etkilere açık olmalarıdır. Kızılötesi bantta arama, takip, işaretleme, görüntüleme gibi saldırı işlevlerinin yanı sıra gözetleme ve karşı tedbir görevlerini de gerçekleştiren bu sistemlerin, herhangi bir zafiyet göstermeden çalışması beklenmektedir. Bu sebeple platform şartlarında istenen veya istenmeyen sebeplerle oluşan elektromanyetik enerjiye karşı dayanıklı olmaları gerekmektedir. Bu koşullar altında optik pencerelerin frekans seçici yüzeyler gibi davranması, yani kızılötesinden görünür dalga boyuna kadar geniş bir spektrumda optik olarak geçirgen olması ve elektromanyetik sinyallerin sıklıkla kullanıldığı mikrodalga frekans bandını filtrelemesi beklenmektedir.

Bu çalışmada optik pencereler için frekans seçici yüzey tasarlama yöntemleri analiz edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Dört yöntem; ITO kaplamalar, grafen, metalik nano kaplamalar ve metalik ağlar; optik iletim ve ekranlama etkinliği özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. ITO, görünür bantta SE performansını artırmak için en yaygın yöntem olarak bilinmektedir. Ancak kızılötesi bantta ITO iletimi sınırlı olmaktadır. Metalik nano kaplama, ekranlama etkinliği ve optik iletim açısından düşük performans gösterse de ITO için bir alternatiftir. Grafen gelişmekte olan bir yöntemdir ve daha fazla geliştirilmesi gerekmektedir. Grafenin ekranlama etkinliği performansı, ekranlama uygulamaları için tek bir malzeme olmasını engellemektedir. Öte yandan, elektromanyetik soğurma özelliği nedeniyle geri yansımanın kritik olduğu uygulamalarda yer alması beklenmektedir. Metalik ağ yapıları, yüksek ekranlama ve optik iletim gerektiren uygulamalar için başarılı bir adaydır. Bununla birlikte, ağın uygulandığı alttaşın dielektrik özellikleri ve kırınım etkileri dikkatlice araştırılmalıdır.

Eylül 2022, 153 sayfa

Anahtar Kelimeler: Frekans seçici yüzey, indiyum tin oksit (ITO), grafen, metalik nano kaplamalar, metalik ağ yapıları, ekranlama etkinliği, optik geçirgenlik, koaksiyel tutucu yöntemi, kırınım.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

ELECTRICALLY CONDUCTIVE, OPTICALLY TRANSPARENT STRUCTURE DESIGN

İlker GÜNAY

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ

During the recent years camera and imaging detectors are being used in frequently in harsh environmental conditions. Especially unmanned air, marine and ground vehicles requires state of art imaging systems for performing challenging missions. Optical openings of these systems are the major source of weakness in terms of environmental effects including high intensity radiated field, radiated emissions etc. Weakness in imaging systems of unmanned vehicles means weakness in platform. Therefore, robust designs against electromagnetic energy is required. Accordingly, optical openings of imaging systems require behaving as FSS (frequency selective surface) or high pass filter, means that blocking electromagnetic signals typically grouped in microwave band and transparent in optical band (high frequency) including visible and IR (infra-red) bands.

In this study, FSS design methods for optical openings are analyzed and realized. After literature survey, candidate methods are determined as Indium Tin Oxides (ITO), Graphene, Nano thickness Metallic Coatings and Metallic Mesh structures. These methods are analyzed and experimentally compared from the point of shielding effectiveness (SE) and optical transmission (OT). ITO has the most widespread usage for increasing SE level. However, OT of ITO decreases fast after near IR band. Best OT performance is acquired in visible band. Nano metallic coatings are another option for visible band applications. On the other hand, achieved SE level will be less than ITO for same OT. Graphene is a remarkable material studied frequently in recent years. Researches show that Graphene would be an option for applications where reflection is crucial. SE of Graphene mostly result of absorbance property. However, current application technology and OT property prevents it usage in optical openings. Metallic mesh structures are the best choice in the stated list. Nevertheless, drawbacks of these structures such as diffraction and response of dielectric substrate should be carefully investigated.

September 2022, 153 pages

Keywords: Frequency selective surface (FSS), Indium tin oxide (ITO), Graphene, Nano metallic coating, Metallic mesh structures, Shielding effectiveness (SE), Optical transparency (OT), Coaxial holder method (CHM), Diffraction.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında bilgisi ve tecrübesi ile yol gösteren, ortaya çıkan problemlerin çözümünde yaptığı öneriler ile çalışmanın bu noktaya gelmesinde büyük katkı payı olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Asım Egemen Yılmaz'a (Ankara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı),

Tez izleme komiteleri ile sınırlı olmamak üzere her an desteklerini ve yönlendirmelerini hissettiğim Sayın Prof. Dr. Birsen Saka'ya (Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği) ve Sayın Dr. İ. Evrim Çolak'a (Ankara Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği),

Tez jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Özlem Özgün'e (Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği) ve Sayın Doç. Dr. Ö. Tolga Altınöz'e (Ankara Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği) değerli katkıları için,

Tez çalışma süresince fikirleri, yardımları ve harika arkadaşlığı ile katkıda bulunan Sayın Tolga Yelboğa'ya (Aselsan A.Ş.),

Sadece doktora çalışması sürecinde değil, iş hayatının her aşamasında verdiği destek ve rehberlik için Sayın İsmail Özseraça'ya (Aselsan A.Ş.), Sayın Ali Telli'ye (Qinetiq) ve Sayın Barış Düzgün'e (Asisguard),

Sevgi ve destekleriyle bana daima güç veren, beni her durumda destekleyen canım eşim Gamze Günay'a, canım annem Sevcihan Günay'a, canım babam Metin Günay'a ve canım kardeşim Aycan Günay'a desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İlker GÜNAY
Ankara, Eylül 2022

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Elektromanyetik Uyumluluk.....	2
1.2 Elektromanyetik Uyumluluk Tarihçesi.....	11
1.3 Elektromanyetik Girişim Örnekleri	13
1.4 Ekranlama Etkinliği.....	16
1.4.1 Yakın alan ve uzak alan	16
1.4.2 Ekranlama etkinliği bileşenleri	17
1.4.3 Soğurma kaybı (A)	19
1.4.4 Yansıma kaybı (R).....	22
1.4.5 Düzeltme faktörü (B, çoklu yansımalar)	24
1.5 Ulrich Metodu.....	25
1.6 Tezin Özgün Tarafları	29
1.7 Tezin Organizasyonu	29
2. ITO KAPLAMA	31
3. GRAFEN	39
4. METAL NANO KAPLAMALAR	45
5. METALİK AĞ YAPILARI	50
5.1 Dizi Elemanlarının Tipi: Hat ve Yama Yapıları	51
5.2 Dizi Elemanlarının Şekli, Boyutu ve Elemanlar Arası Boşluklar	52
5.3 Alttaşın Elektriksel Özellikleri.....	59
5.4 Kırınım Dizisi Oluşumu	61
5.5 MTF Değişimi	68
6. BASKI TEKNOLOJİLERİ	70
6.1 Temaslı Baskı Teknolojileri.....	72
6.1.1 Kalın film baskı	72
6.2 Temasız Baskı Teknolojileri	74
6.2.1 Püskürtmeli baskı.....	74
6.2.2 Fotolitografi	76
7. ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	82
7.1 Koaksiyel Tutucu Yöntemi	84
7.2 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu Metodu.....	94
7.3 Serbest Uzak Metodu	98
8. OPTİMİZASYON	102
8.1 Genetik Algoritma Optimizasyonu	103
8.1.1 İlk popülasyonu oluşturma.....	105

8.1.2	Uygunluk hesaplama	106
8.1.3	Seçim	106
8.1.4	Çaprazlama	107
8.1.5	Mutasyon	108
8.1.6	Seçkinlik (Elitizm) modeli	108
8.2	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu	109
8.2.1	Sosyal davranışların simülasyonu	111
9.	SONUÇLAR	115
10.	DEĞERLENDİRME	143
	KAYNAKLAR	146
	ÖZGEÇMİŞ	153



KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Alternative Current
CISPR	: Uluslararası Radyo Girişimi Özel Komitesi
CST MWS	: Computer Simulation Technology Microwave Studio
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
dB	: Desibel
DC	: Direct Current
EMC	: Electromagnetic Compatibility
EMI	: Elektromagnetic Interference
EMP	: Elektromagnetic Pulse
ESD	: Elektrostatic Discharge
EUV	: Extreme Ultraviolet
FCC	: Federal Communications Commission
GA	: Genetik Algoritma
IC	: Integrated Circuit
IEC	: International Electrotechnical Commission
ITO	: Indium Tin Oxide
KT	: Koaksiyel Tutucu
LCD	: Liquid Crystal Display
MTF	: Modülasyon Transfer Fonksiyonu
PSO	: Parçacık Sürüşü Optimizasyonu
PVD	: Physical Vapor Depositon
RKA	: Radar Kesit Alanı
SE	: Shielding Effectiveness
TE	: Transverse Electric
TEM	: Transverse Electromagnetic
TM	: Transverse Magnetic
VNA	: Vector Network Analyzer
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio
ZnS	: Zinc Sulphide

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Temel Elektromanyetik Uyumluluk Problemi Şeması	3
Şekil 1.2 Saat Sinyali Tanımlamaları.....	5
Şekil 1.3 Temel Elektromanyetik Girişim Tipleri	6
Şekil 1.4 Diğer EMC durumları.....	9
Şekil 1.5 Dalga Empedansının Kaynak ile Aradaki Mesafe ile Değişimi	17
Şekil 1.6 Manyetik Alana Karşı Ekranlama Örneği.....	18
Şekil 1.7 Soğurucu Malzeme içinde Mesafe ile Elektrik Alan Değişimi.....	20
Şekil 1.8 Soğurma Kaybının Deri Kalınlığına Oranı	21
Şekil 1.9 Altının Frekansa Göre Değişen Deri Kalınlığı	21
Şekil 1.10 Gelen Elektromanyetik Dalga, Yansıyan Dalga ve İletilen Dalga.....	22
Şekil 1.11 Ekran Sınırlarında Oluşan Kısmi Yansıma ve İletim	23
Şekil 1.12 İnce Ekran Durumunda Oluşan Çoklu Yansıma.....	24
Şekil 1.13 Metalik Ağ Yapısı ve Eşdeğer Devre Modeli (Ulrich 1967)	26
Şekil 2.1 In_2O_3 Kristal yapısı (Elfallal vd. 1993).....	32
Şekil 2.2 ITO Kaplanmış (Sol) ve Çıplak B270 (Sağ) Cam Alttaş Görünümü	35
Şekil 2.3 PerkinElmer Lambda 950 UV/VIS Spektrometre Düzenegi	36
Şekil 2.4 ITO Kaplama Optik Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları	37
Şekil 2.5 ITO kaplama ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları.....	38
Şekil 3.1 a) Polimer/İletken Dolgu Kompozitlerinde Sızma Davranışının Şematik Olarak Gösterimi (Ram vd. 2017) b) İletken Nano Kompozitlerin Elektriksel Davranışında Baskın Mekanizma Olan, Birbirinden dt Mesafeye Yerleştirilmiş İki Grafen Levha Arasındaki Elektron Tünelleme Gösterimi (Santagiuliana 2019)	39
Şekil 3.2 Grafen Nano Kompozit Sensör Uygulamaları	43
Şekil 4.1 4 nm Gümüş Kaplanmış ve Kaplanmamış M-ZnS Örneği	47
Şekil 4.2 4 nm Gümüş Kaplamaya ait Ekranlama Etkinliği Grafiği	48
Şekil 4.3 4 nm Gümüş Kaplamaya ait Optik Geçirgenlik Grafiği	49
Şekil 5.1 Kapasitif ve İndüktif Yapıların Frekans Tepkisi	51
Şekil 5.2 Metalik Ağ Yapıları Kategorileri (Munk 1968).....	52
Şekil 5.3 Açıklık (Slot) Tipi Periyodik Yüzey Modeli	53
Şekil 5.4 Hat Uzunluğuna Bağlı Olarak Rezonans Frekansı Değişimi.....	54
Şekil 5.5 Hat Genişliğine Bağlı Olarak Rezonans Frekansı Değişimi.....	54
Şekil 5.6 Açıklık Genişliğine Bağlı Olarak Rezonans Frekansı Değişimi.....	55
Şekil 5.7 Daire Tipi Döngü Yapısı Modeli.....	56
Şekil 5.8 Daire Tipi Döngü Yapısında Yarıçapa Göre Rezonans Frekansı Değişimi.....	57
Şekil 5.9 Daire Tipi Döngü Yapısındaki Kertiğe Göre Bant Genişliği Değişimi	57
Şekil 5.10 Dizi Elemanları Arası Boşlukların Değişimi ile İletim Kaybının Değişimi ($l=12$ mm, $t=1.2$ mm)	58
Şekil 5.11 Dielektrik Sabitinin Rezonans Frekansına Etkisi ($dx=dy=20$, $l=14$, $t=1$, $d=2$)	59
Şekil 5.12 Dielektrik Alttaş Kalınlığının Rezonans Frekansına Etkisi ($dx=dy=20$, $l=14$, $t=1$, $\epsilon_r=4$).....	60
Şekil 5.13 Dielektrik Üzerindeki bir Açıklık Dizisinin Elektromanyetik Dalganın Geliş Açısına Göre İletim Kaybı Değişimi ($dx=dy=20$, $t=1$, $l=14$, $\epsilon_r=4$)	61
Şekil 5.14 Izgara Yapısı ve Oluşturduğu Kırınım Dizisi	62
Şekil 5.15 $g=250$ μm için Oluşan Kırınım Dizisi (Kohin vd. 1993).....	64

Şekil 5.16 Yeşil (510 nm) ve MWIR (2900 nm) Dalga boyuna Sahip Lazer Kullanımında Kırınım Dizisi Değişimi.....	67
Şekil 5.17 $g=100\ \mu\text{m}$, $2a=5\ \mu\text{m}$ Izgara İçin Optik Geçirgenlik Ölçüm Sonucu.....	68
Şekil 5.18 Izgara Yapısının MTF'e etkisi (Kohin vd. 1993)	69
Şekil 6.1 Baskı Teknolojileri	70
Şekil 6.2 Kalın Baskı Bileşenleri	72
Şekil 6.3 Kalın Film Baskı Örneği.....	74
Şekil 6.4 Püskürtmeli Mürekkep Sistemi.....	75
Şekil 6.5 Püskürtmeli Baskı Örneği.....	75
Şekil 6.6 Püskürtmeli Mürekkep Baskının Mikroskop Görüntüsü	76
Şekil 6.7 Fotolitografi Prosesi Adımları	78
Şekil 6.8 Termal Buharlaştırma Yöntemi	79
Şekil 6.9 Elektron Demeti Buharlaştırma Yöntemi	79
Şekil 6.10 Kopartma Yöntemi	80
Şekil 6.11 Fotolitografi Prosesi Mikroskop Görüntüsü	81
Şekil 7.1 1" Örnek Boyutları ile Kullanılan Koaksiyel Tutucu Test Düzenegi	86
Şekil 7.2 3" Örnekler için Tasarlanan Koaksiyel Tutucu	87
Şekil 7.3 Referans (Solda) ve Yük (Sağda) Örnekleri	88
Şekil 7.4 a) Yük Örneği ile yüklenen Koaksiyel Tutucu Eşdeğer Devresi b) Referans Örneği ile Yüklenen Koaksiyel Tutucu Eşdeğer Devresi.....	90
Şekil 7.5 1" Örnekler için Kullanılan Koaksiyel Tutucu VSWR ölçümleri	93
Şekil 7.6 3" Örnekler için Kullanılan Koaksiyel Tutucu VSWR ölçümleri	93
Şekil 7.7 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu	95
Şekil 7.8 Dalga kılavuzları için Hazırlanmış Örnek Seti (soldan: WR284, WR187, WR137, WR90 ve WR62) (Moučka 2019)	96
Şekil 7.9 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu Metodu (Saglam 2009)	98
Şekil 7.10 IEEE 299 Manyetik Alan Test Düzenegi.....	100
Şekil 7.11 Lens Kullanımının Bulunduğu Anten Düzenegi (Dalkılıç 2014)	101
Şekil 8.1 Genetik Algoritma Optimizasyon Basamakları	105
Şekil 8.2 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması	114
Şekil 9.1 Örnek Izgara Yapısı	116
Şekil 9.2 $400\ \mu\text{m}/16000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısı Direnç ve Reaktans Sonuçları	117
Şekil 9.3 $400\ \mu\text{m}/16000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısı için Ekranlama Etkinliği Sonuçları	118
Şekil 9.4 $100\ \mu\text{m}/4000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısı Direnç ve Reaktans Sonuçları	119
Şekil 9.5 $100\ \mu\text{m}/4000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısı için Ekranlama Etkinliği Sonuçları	119
Şekil 9.6 $100\ \mu\text{m}/2000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısı Direnç ve Reaktans Sonuçları	120
Şekil 9.7 $100\ \mu\text{m}/2000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısı için Ekranlama Etkinliği Sonuçları	120
Şekil 9.8 $5\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısı için Direnç ve Reaktans Sonuçları	121
Şekil 9.9 $5\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısı için Ekranlama Etkinliği Sonuçları	122
Şekil 9.10 Altı Yüzlü ve Dört Yüzlü Ağ Yapısı Modelleri.....	123
Şekil 9.11 Altı Yüzlü ve Dört Yüzlü Ağ Yapısı Kullanılmış Modeller	123
Şekil 9.12 $400\ \mu\text{m}/16000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısına Ait Referans ve Örnek Malzemeleri.....	124
Şekil 9.13 $100\ \mu\text{m}/4000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısına Ait Referans ve Örnek Malzemeleri.....	125
Şekil 9.14 $100\ \mu\text{m}/2000\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısına Ait Referans ve Örnek Malzemeleri.....	125
Şekil 9.15 $5\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$ Izgara Yapısına Ait Referans ve Örnek Malzemeleri.....	126
Şekil 9.16 $400\ \mu\text{m}/16000\ \mu\text{m}$ Örneğe Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları	126

Şekil 9.17 100 µm/4000 µm Örneğe Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları	127
Şekil 9.18 100 µm/2000 µm Örneğe Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları	128
Şekil 9.19 5 µm/100 µm Örneğe Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları	129
Şekil 9.20 Örneklere ait Izgara Yapıları (Sol üstte B1, sağ üstte B3, sol altta B4 ve sağ altta görüntülerin alındığı mikroskop düzeneği).....	130
Şekil 9.21 B1 Örneğine Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları	131
Şekil 9.22 B3 Örneğine Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları	131
Şekil 9.23 B4 Örneğine Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları	132
Şekil 9.24 B1 (5 µm/50 µm) (Sol) ve B4 (15 µm/150 µm) (Sağ) Örneklerine ait Empedans Değişimi.....	133
Şekil 9.25 18 GHz'e kadar 15 dB Ekranlama Etkinliği Sağlayan Hat Genişliği ve Optik Kapatıcılık Değerleri	134
Şekil 9.26 Battelle Laboratuvarı'nın ölçümleri ile Analizlerin Karşılaştırılması (Jacoby vd. 2009).....	135
Şekil 9.27 Snell Kanunu Gösterimi.....	136
Şekil 9.28 F-35 Uçağına ait Elektro-Optik Hedefleme Sistemi	137
Şekil 9.29 Elektromanyetik Dalganın Geliş Açısına Göre Ekranlama Etkinliği	137

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Bazı İyi İletkenler ve Özellikleri (Günay vd. 2021)	46
Çizelge 5.1 B1 Örneğinde Her Bir Dizi Elemanının Yüzdesel Enerji Değeri	65
Çizelge 5.2 $g=50\ \mu\text{m}$ ve $2a=5\ \mu\text{m}$ Örneğinde $0.5\ \mu\text{m}$ Dalga Boyu için Oluşan Kırınım Açıları	66
Çizelge 5.3 $g=50\ \mu\text{m}$ ve $2a=5\ \mu\text{m}$ Örneğinde $3\ \mu\text{m}$ Dalga Boyu için Oluşan Kırınım Açıları... ..	67
Çizelge 7.1 Elektriksel Olarak İnce Örnek ve Yakın Alan – Uzak Alan Geçişi.....	88
Çizelge 7.2 Farklı Koaksiyel Tutucu (KT) Boyutları için Kesim Frekansı Değerleri	92
Çizelge 9.1 Metalik Ağ Yapıları Detayları	117
Çizelge 9.2 1” Boyutlarındaki Örnek Özellikleri (Günay vd. 2021)	130
Çizelge 9.3 Bazı Altaşların Dielektrik Sabitleri (Harris 1999).....	134
Çizelge 9.4 Genetik Algoritma Optimizasyonu Yöntemiyle Bulunan Analiz Sonuçları.....	140
Çizelge 9.5 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Yöntemiyle Bulunan Analiz Sonuçları.....	140
Çizelge 9.6 Optik Camlar için Frekans Seçici Yüzey Tasarım Yöntemleri Karşılaştırması (Günay vd. 2021).....	142

1. GİRİŞ

Radyo ve telgraf iletişiminin ilk günlerinden itibaren, bir kıvılcım aralığının spektral içerik (frekans bileşenleri) bakımından zengin elektromanyetik dalgalar ürettiği ve bu dalgaların radyo alıcıları ve telefon gibi çeşitli elektronik ve elektrikli cihazlarda parazite veya gürültüye neden olabileceği bilinmektedir. Yıldırım, röleler, DC (Direct Current ya da doğru akım) elektrik motorları ve floresan ışıklar gibi çok sayıda başka elektromanyetik emisyon kaynağı da spektral içerik açısından zengin elektromanyetik dalgalar üretmekte ve bu cihazlarda parazite neden olabilmektedir. Yüksek gerilim enerji nakil hatları, güç frekansında (ABD 60 Hz, Avrupa ise 50 Hz) elektromanyetik emisyon üretmektedir. Radyo vericileri ise bilgileri (ses, müzik vb.) bir taşıyıcı frekansta kodlayarak istenilen yayınları iletmektedir. Radyo alıcıları bu elektromanyetik dalgaları alıp yükseltmekte ve dalgada kodlanmış bilgiyi ortaya çıkarmaktadır. Radar vericileri de tek frekanslı bir taşıyıcının darbelerini iletmektedir. Bu taşıyıcı frekans açılıp kapatıldığında, bu darbeler antenden dışarı doğru yayılmakta, bir hedefe çarpmakta ve radar antenine geri dönmektedir. Toplam süre, hedefin radar anteninden uzaklığı ile doğrudan ilişkili olmaktadır. Bu radar darbesinin spektral içeriği, radyo yayınlarından daha geniş bir frekans bandında taşıyıcı etrafında dağıtılmaktadır. Elektromanyetik emisyonların bir başka kaynağı ise, özellikle dijital bilgisayarlar ve genel olarak dijital elektronik cihazlar ile ilişkili olmaktadır. Bu dijital cihazlar, ikili sistemde iletim yapmak için darbeler kullanmaktadır. Sayılar ve diğer semboller, bu ikili rakamların dizileri olarak temsil edilmektedir. Darbenin kapalıdan açık ve tam tersi geçiş süresi, darbenin spektral içeriğini belirlemede belki de en önemli faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Hızlı (kısa) geçiş süreleri, daha fazla harmonik üreterek daha geniş bir bantta yayınıma sebep olmaktadır. Dijital cihazların spektral içeriği genellikle geniş bir frekans aralığını kaplamakta, elektrikli ve elektronik cihazlarda girişime neden olabilmektedir (Clayton 2006).

Günlük hayatta da elektromanyetik girişim gözlenebilmektedir. Örneğin yıldırım deşarjlarının yakın mesafede oluşması bir AM radyoda üretilen gürültüyle sonuçlanabilmektedir. Yıldırım deşarjı geniş bantlı gürültü olduğundan radyonun giriş

filtresinden geçerek sinyal üzerinde gürültü oluşturabilmektedir. Ayrıca bir FM radyo istasyonundan veya TV istasyonundan gelen güçlü bir yayın, dijital bir bilgisayar tarafından algılanabilmekte ve bu da bilgisayarın veri veya kontrol sinyali olarak yorumlamasına neden olarak bilgisayarın yanlış çalışmasına neden olabilmektedir. Tersine, bilgisayar ya da telefon, TV ekranı üzerinde parazite neden olan emisyonlar oluşturabilmektedir. Diğer elektronik sistemlerle uyumlu olarak çalışabilen, parazit üretmeyen ve parazite duyarlı olmayan bir elektronik sistem, çevresiyle elektromanyetik olarak uyumlu olarak adlandırılmaktadır. Bir sistem, üç kriteri karşılıyorsa çevresiyle elektromanyetik olarak uyumlu denilmektedir:

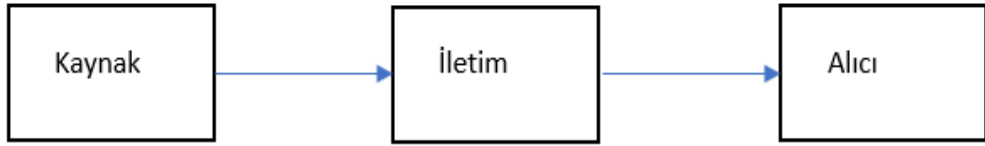
1. Kendi kendine girişim yapmıyorsa
2. Diğer sistemlerle etkileşime neden olmuyorsa
3. Diğer sistemlerden kaynaklanan emisyonlara duyarlı değilse

Elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic Compatibility, EMC) için tasarım yapmak sadece istenen fonksiyonel performans için değil, cihazın satılabilmesi için dünyanın hemen hemen tüm ülkelerindeki yasal gereklilikleri karşılama için de gerekli olmaktadır. Yeni ve heyecan verici bir işlevi yerine getirmek için elektronik bir ürün tasarlamak, piyasaya sürülemediyse, çaba kaybıdır! EMC tasarım teknikleri ve metodolojisi, elektronik tasarımın ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Dijital sistemlerin artan saat (clock) hızlarına ve veri hızlarına yönelik eğilim devam ettikçe, kablosuz veri ve güç aktarımı yaygınlaştıkça elektromanyetik uyumluluğun da önemi artmaktadır.

1.1 Elektromanyetik Uyumluluk

Yukarıda bahsedildiği gibi EMC, elektromanyetik enerjinin üretimi, iletimi ve alımı ile ilgilenmektedir. EMC sorununun bu üç yönü, herhangi bir EMC tasarımının temel çerçevesini oluşturmaktadır. Bu durum Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Bir kaynak (yayıncı olarak da adlandırılır) emisyonu üretmekte ve bağlantı yolu aracılığıyla, emisyon enerjisini alıcıya aktarmaktadır. Bu da genellikle istenmeyen bir sonuca sebep olmaktadır. Alınan enerjinin alıcıda istenmeyen ya da kontrolsüz bir çıktı oluşturmaya girişim denilmektedir. Elektromanyetik enerjinin aktarımı, sıklıkla istenmeyen bağlaşım modları

yoluyla gerçekleşmektedir. Bununla birlikte elektromanyetik girişimin oluşabilmesi için, alıcı girişinde yeterli büyüklükte ve/veya spektral içerikte sinyal oluşması gerekmektedir. Elektromanyetik enerjinin kasıtsız iletimi veya alımı mutlaka zararlı değildir; alıcının istenmeyen davranışı girişimi oluşturmaktadır. Bu nedenle, alınan enerjinin alıcı tarafından işlenmesi, girişimin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği sorusunun önemli bir parçası olmaktadır. Çoğu zaman, alıcıya gelen bir sinyalin o alıcıda girişime neden olup olmayacağını önceden kestirmek oldukça güçtür. Örneğin, bir radar kapsamındaki dağınıklık, acemi bir radar operatörünün istenen verileri yanlış yorumlamasına neden olabilirken, dağınıklık önemli deneyime sahip bir operatör için sorun yaratmayabilmektedir. Özellikle değerlendirmenin personel tarafından yapıldığı sistemlerde girişim objektif olarak tanımlanmayabilmektedir. Bu, elektromanyetik problem tanımı Şekil 1.1'de gösterildiği gibi basit olsa da sorunun üç bileşenini net bir şekilde tanımlamanın genellikle zor olduğunu belirtmektedir.

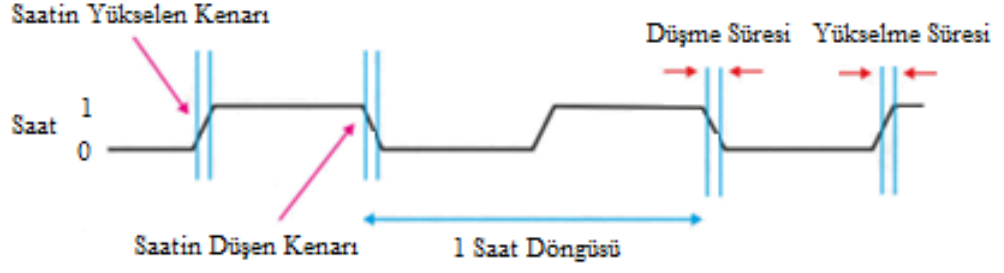


Şekil 1.1 Temel Elektromanyetik Uyumluluk Problemi Şeması

Bir kaynak veya alıcının amaçlanan veya istenmeyen gürültü kaynağı olarak sınıflandırılabilir de önemli olmaktadır. Aslında, bir kaynak veya alıcı her iki modda da davranabilmektedir. Kaynağın veya alıcının hedeflenip hedeflenmediği, kaynak veya alıcı tipinin yanı sıra bağlantı yoluna da bağlıdır. Örnek olarak, iletimi taşıyıcı frekansına ayarlanmış bir radyo alıcısı için AM radyo istasyonu vericisi, hedeflenen bir vericiyi oluşturmaktadır. Öte yandan, aynı AM radyo iletimi, vericinin taşıyıcı frekansına ayarlanmamış başka bir radyo alıcısı tarafından alındığında, emisyon hedeflenmemektedir. Emisyonları hiçbir yararlı amaca hizmet edemeyen bazı kaynaklar da bulunmaktadır. Örneğin bir floresan lamba (görünmez) elektromanyetik emisyon yaymaktadır. Bu girişimi engellemek içinse 3 yol bulunmaktadır:

1. Emisyonu kaynağında bastırmak,
2. Bağlantı yolunu mümkün olduğunca verimsiz hale getirmek,
3. Alıcıyı emisyona daha az duyarlı hale getirmek.

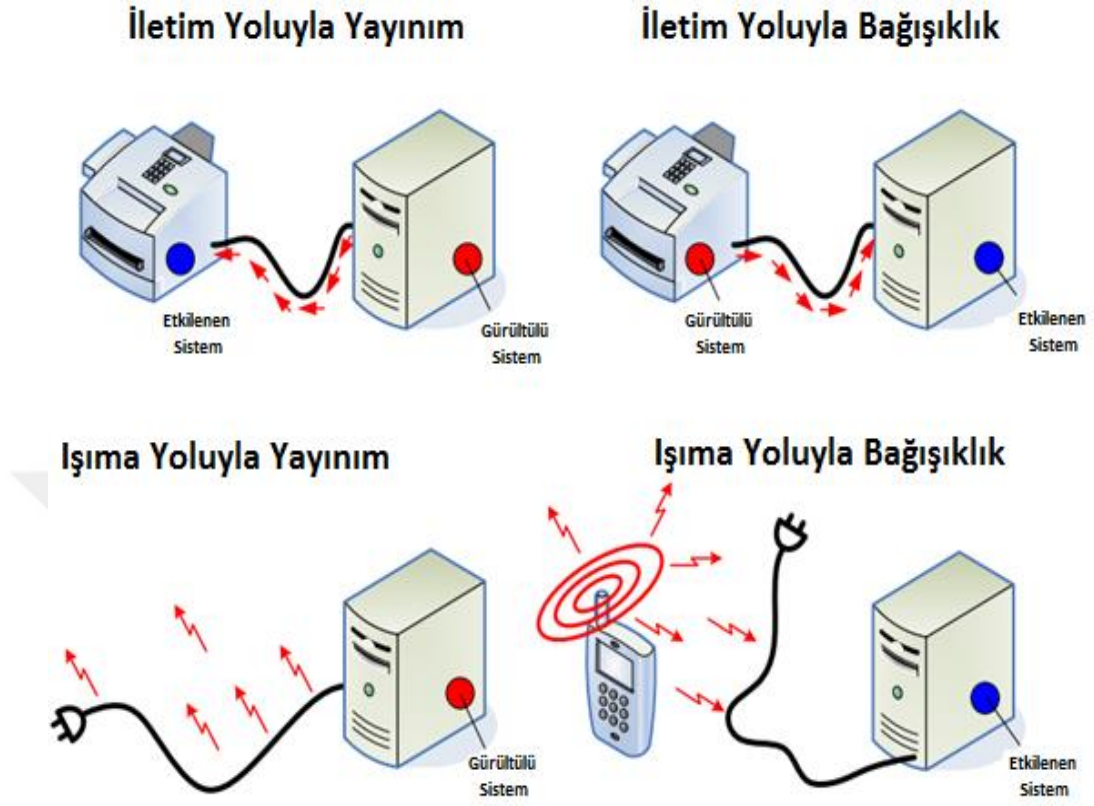
EMC problemini incelerken bu üç alternatif akılda tutulmalıdır. ‘İlk savunma hattı’ emisyonu kaynağında mümkün olduğunca bastırmaktır. Örneğin, sayısal darbelerin emisyon frekansı periyodu tarafından belirlense de yüksek frekanslı spektral içeriğe büyük oranda yükselme/düşme süreleri katkıda bulunmaktadır. Genel olarak, bağlaşım yolundan geçen sinyalin frekansı ne kadar yüksek olursa, bağlaşım yolu o kadar verimli olmaktadır. Bu yüzden sayısal sinyallerin yükselme/düşme süreleri mümkün olduğunca yavaş olmalıdır. Bununla birlikte, sayısal sinyallerin yükselme/düşme süreleri, sayısal devrenin çalışma kriterleri tarafından belirlenmektedir. Diğer bir ifadeyle, sistem 1ns yükselme/düşme süreleriyle düzgün bir şekilde çalışabiliyorken, 100 ps yükselme/düşme sürelerine sahip sayısal sinyalleri kullanmak elektromanyetik girişim bakımından doğru bir tercih olmayacaktır. Bir emisyonun yüksek frekanslı spektral içeriğini azaltmak, bağlaşım yolunun verimliliğini düşürme eğiliminde olmakta ve dolayısıyla alıcı tarafındaki sinyal seviyesini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bağlaşım yolunun verimliliğini azaltmak için ‘kaba kuvvet’ yöntemleri bulunmaktadır. Örneğin, alıcıyı metal bir muhafaza (bir kalkan) içine yerleştirmek, bağlantı yolunun verimliliğini azaltmaya hizmet edecektir. Ancak korumalı muhafazalar, kaynağın yükselme/düşme süresini azaltmaktan daha pahalı olmaktadır. Ayrıca çoğu zaman bir sistem içerisindeki gerçek performansları, idealden çok daha düşük çıkmaktadır. Alıcının duyarlılığını azaltmak, uygulamak ve yine de ürünün istenen işlevini korumak oldukça maliyetli ve zorlayıcı bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir alıcının gürültüye karşı dayanımını artırmaya, bir sayısal alıcıda hata düzeltici kodların kullanılması örnek olarak verilebilmektedir. Alıcıya istenmeyen elektromanyetik enerji gelmesine rağmen, hata düzeltici kodlar alıcının düzgün çalışmasını sağlayabilmektedir.



Şekil 1.2 Saat Sinyali Tanımlamaları

Şekil 1.1’de soldan başlayarak bağlaşımı azaltmaya çalışmak, genellikle daha kolay ve daha az maliyetle sonuca ulaştırmaktadır. Bir sistemi elektromanyetik olarak uyumlu hale getirmek için eklenen maliyeti en aza indirmek, EMC tasarımında önemli parametrelerden birisidir. Tüm elektronik kartlar ve birimler metalik muhafazalarla korunabilmekte ve dahili pillerle çalıştırılabilmektedir ancak ürünün görünümü, faydası ve maliyeti müşteri için kabul edilemez bir hale gelebilecektir. Elektromanyetik enerjinin transferi (girişimlerin önlenmesi ile ilgili olarak) dört alt gruba altında incelenmektedir:

1. İletim Yoluyla Yayınım
2. İletimle Yoluyla Bağışıklık
3. Işıma Yoluyla Yayınım
4. Işıma Yoluyla Bağışıklık



Şekil 1.3 Temel Elektromanyetik Girişim Tipleri

Tipik bir elektronik sistem genellikle birbirleriyle kablolar aracılığıyla iletişim kuran bir veya daha fazla alt sistemden oluşmaktadır. Bu alt sistemlere güç sağlamanın bir yolu, genellikle kurulum sahasının ticari AC (alternatif akım) güç sistemi olmaktadır. Elektronik sistemdeki bir güç kaynağı, bu AC 120 V, 60 Hz gerilimi (Avrupa'da 240 V, 50 Hz), sistemin dahili elektronik bileşenlerine güç sağlamak için gereken çeşitli DC (doğru akım) gerilim seviyelerine dönüştürmektedir. Örneğin, sayısal haberleşme devreleri için 5 VDC, analog elektronik devreler içinse +12 VDC ve -12 VDC gerilimler gerekebilmektedir. Motor gibi elektromekanik bileşenlere güç sağlamak içinse başka DC gerilim seviyeleri gerekebilmektedir. Bazen, soğutma fanları gibi diğer bileşenlere güç sağlamak için de 60 Hz (50 Hz) AC güç gerekmektedir. 60 Hz, 120 VAC sistem gücü, ticari güç açısından elde edilmektedir. Alt sistemlerin birbiriyle haberleşmesini sağlamak amacıyla da başka kablolar gerekmektedir. Kısacası gerek güç aktarımı gerekse

haberleşme amacıyla sistem içerisinde oldukça fazla bağlantı kablosu bulunmaktadır. Bu kabloların tümü, elektromanyetik enerji yayma ve/veya toplama potansiyeline barındırmakta ve bunu yaparken de oldukça verimli olmaktadır. Genel olarak, kablo ne kadar uzunsa elektromanyetik enerji yaymada veya toplamada o kadar verimli olmaktadır. Girişim sinyalleri de bu kablolar üzerinden doğrudan iletim yoluyla alt sistemler arasında iletilebilmektedir.

Alt sistemleri metalik muhafaza içerisine almak ısıma yoluyla yayılımı önlemek için sıklıkla tercih edilen yöntemlerden bir tanesidir. Fakat bu metal yüzeylerde iç veya dış sinyaller tarafından akımlar indüklenebilmektedir. Bu indüklenen akımlar daha sonra dış ortama veya metal muhafaza içine yayılabilmektedir. Bu nedenle metalik bir kafes içerisine almak her zaman kesin çözüm olmamaktadır. Dahası, plastik dış gövdeye sahip muhafazaların kullanılması daha yaygın hale gelmektedir. Özellikle havacılık sektöründe ağırlık azaltımı için cam elyafı (karbon fiber) bileşenler metallerin yerini almaktadır. Bu metalik olmayan muhafazalarda bulunan elektronik devreler, çoğunlukla, tamamen elektromanyetik emisyonlara açık hale gelmektedir. Bu nedenle, elektromanyetik girişim olasılığı artmaktadır. EMC sorununun, Şekil 1.3'te gösterilen dört yönü bu hususları yansıtmaktadır. Elektromanyetik emisyonlar, AC güç kablosundan, bir alt sistem içeren metalik bir mahfazadan, alt sistemleri bağlayan bir kablodan veya metalik olmayan bir mahfaza içindeki bir elektronik bileşenden meydana gelebilmektedir. Zamanla değişen bir akım, aslında, ivmelenen bir yüküdür. Isıma yoluyla yayılan emisyonlar üreten temel kaynak da yüklerin ivmelenmesi olmaktadır. Elektromanyetik uyumluluk sorunun anlaşılmasını engelleyen bazı kavram yanılgıları bulunmaktadır. Örneğin, AC güç kablosunun yalnızca 60 Hz sinyalleri taşıdığı fikri bunlardan bir tanesidir. Bu kabloun birincil amacı sisteme 60 Hz 120 VAC güç aktarımı olsa da AC güç kablosunda çok daha yüksek frekanslı sinyallerin bulunabilmektedir. Bu yüksek frekanslı sinyaller, bir dizi bağlaşım yolu aracılığıyla alt sistemlerden gelen AC güç kablosuna aktarılmaktadır. Bu uzun (1 m veya daha fazla) kabloda bu yüksek frekanslı akımlar bulunduğunda, oldukça verimli bir şekilde ısıma yapmaktadır. Ayrıca, bu uzun kablo verimli bir anten olarak davranarak Şekil 1.3'te gösterildiği gibi yakındaki diğer elektronik sistemlerden yayılan emisyonları toplayabilmektedir. Bu harici sinyaller, bu kabloda ve alt sistemleri birbirine bağlayan herhangi bir kabloda indükledikten sonra, alt sistemlerin dahili bileşenlerine

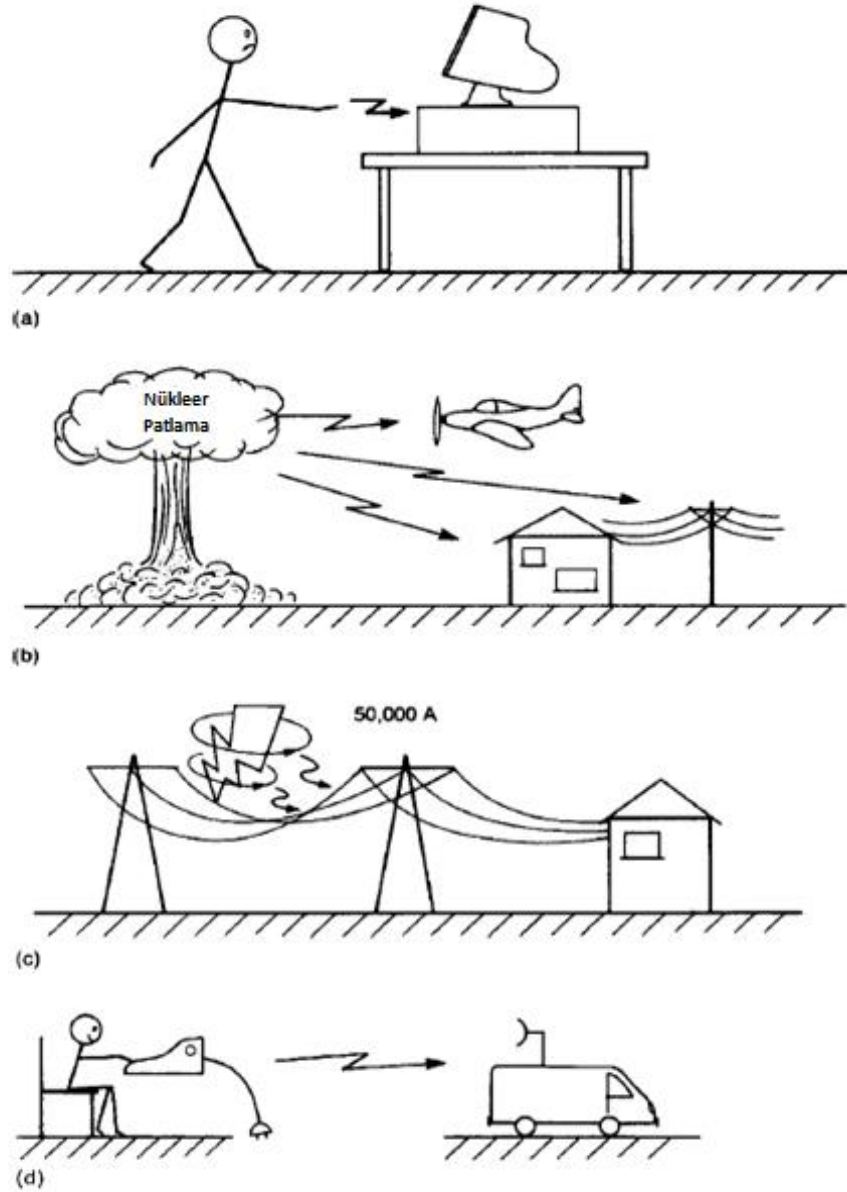
aktarılabilmekte ve girişime neden olabilmektedir. Özetlemek gerekirse, bu yapıların veya tellerin girişim sinyallerini taşıması hedeflenmese bile, istenmeyen sinyaller güç kablosu, ara bağlantı kabloları, metal kabinler veya alt sistemlerin dahili devreleri tarafından yayılabilmekte ve alınabilmektedir.

Elektromanyetik enerji kaynaklı emisyonlar, yalnızca havada yayılan elektromanyetik dalgalarla değil, aynı zamanda Şekil 1.3'te gösterildiği gibi metalik iletkenler üzerindeki doğrudan iletimle de meydana gelmektedir. Genellikle doğrudan iletimin olduğu bağlantı yolu, doğası gereği ışıma kaynaklı bağlantı yolundan daha verimli olmaktadır. Elektronik tasarımcılar da istenmeyen enerji iletimini engellemek için filtreler gibi engelleme bileşenleri kullanmaktadır.

Elektromanyetik uyumluluk için birincil kaygı, elektronik sistemlerin devlet kurumları tarafından dayatılan yasal gerekliliklerle uyumlu olacak şekilde tasarımı olmaktadır. Ancak, bunların dışında da EMC endişeleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 1.4'te gösterilmektedir. Şekil 1.4a, günümüzün küçük ölçekli entegre devreleri olan elektrostatik deşarj (ESD) için giderek yaygınlaşan bir duyarlılık problemini göstermektedir. Lastik tabanlı ayakkabılarla naylon bir halı üzerinde yürümek vücutta statik yük birikmesine neden olmaktadır. Klavye gibi elektronik bir cihaza dokunulduğunda bu statik yük cihaza aktarılabilmekte ve parmak uçları ile cihaz arasında bir ark oluşturulabilmektedir. Doğrudan yük aktarımı, entegre devre yongaları gibi elektronik bileşenlerin kalıcı olarak tahrip olmasına neden olabilmektedir. Ark ayrıca elektromanyetik dalgaya sebep olarak devrelere zarar verebilmektedir. Bu, sistem arızasına neden olabilmektedir. ESD bugün oldukça yaygın bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

1940'ların ortalarındaki ilk nükleer patlamadan sonra, patlamanın etkisiyle elektronik sistemlerde kullanılan yarı iletken cihazların (özellikle yükselteçler) zarar gördüğü tespit edildi. Bu, patlamanın doğrudan fiziksel etkilerinden değil, Şekil 1.4b'de gösterildiği gibi patlama içindeki yük ayrımı ve hareket tarafından oluşturulan yoğun bir elektromanyetik dalgadan kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, bu elektromanyetik darbenin (EMP) etkisine karşı iletişim ve veri işleme tesislerinin bağışık hale getirilmesi konusunda askeri

topluluklarda önemli bir ilgi bulunmaktadır. Buradaki endişe patlamanın fiziksel etkileri değil, iletişim ve veri işleme tesislerinin EMP tarafından işlevsiz hale getirilmesi durumunda misilleme eyleminin yönlendirilememesinden kaynaklanmaktadır. Bu, yayılan bir duyarlılık problemini temsil etmektedir.



Şekil 1.4 Diğer EMC durumları

Yıldırım sık sık meydana gelmekte ve Şekil 1.4d’de gösterilen doğrudan çarpmalar oldukça önemlidir. Bununla birlikte, elektronik sistemler üzerindeki dolaylı etkileri de

aynı derecede yıkıcı olabilmektedir. ‘Yıldırım kanalı’ 500 kA’e kadar doğru akım taşıyabilmektedir. Bu yoğun akımdan kaynaklanan elektromanyetik alanlar ya doğrudan radyasyon yoluyla ya da ticari güç sistemine bağlanarak ve ardından AC güç kablosu aracılığıyla cihaza iletilerek elektronik sistemlere ulaşabilmektedir. Sonuç olarak, ürünü AC güç kablosundaki geçici gerilimlere karşı bağışıklığı açısından tasarlamak ve test etmek önemli olmaktadır. Çoğu üretici, AC güç kablosuna ‘dalgalanmalar’ enjekte eder ve ürünlerini bu ve diğer istenmeyen geçici gerilimlere dayanacak şekilde tasarlamaktadır.

Elektromanyetik emisyonların yetkisiz kişiler tarafından toplanmasını önlemek de son zamanlarda ilgi çeken konulardan bir tanesidir. Örneğin, Şekil 1.4d’de gösterildiği gibi elektromanyetik emisyonları izleyerek bir klavyede ne yazıldığını belirlemek mümkün olmaktadır. Ayrıca, iletişim veya veri içeriğinin belirlenebileceği, yayılan emisyonların doğrudan toplanmasının başka örnekleri de bulunmaktadır. Elbette ordunun TEMPEST olarak adlandırdığı bu sorunu kontrol altına alması bilgi güvenliği bakımından bir zorunluluk olarak değerlendirilmektedir. Ticari topluluklar ise kritik bilgi birikimlerinin ve pazardaki rekabet gücünü etkileyebilecek ticari sırların korunması açısından TEMPEST konusuyla ilgilenmektedir.

Girişimin etkilerini anlamak için kullanılan birincil araç matematiksel bir model kullanmaktır. Matematiksel bir model, fenomen hakkındaki anlayışımızı nicelleştirmekte ve aynı zamanda içgüdüsel olarak anlaşılmayan önemli özellikleri ortaya çıkarabilmektedir. Ayrıca matematiksel modeller tasarım sürecine de katkı sağlamaktadır. Modelin fenomeni yeterince temsil edip etmediğini belirleyen kriter, deneysel olarak gözlemlenen sonuçları tahmin etmek için kullanılıp kullanılamayacağı tarafından belirlenmektedir. Modelin çıktıları, olgunun deneysel olarak gözlemlenen davranışı ile ilişkili değilse, kullanılamamaktadır. Bununla birlikte, modelden kaynaklanan denklemleri çözmek ve onlardan fiziksel olaya dair öngörüler çıkarmak da oldukça faydalı olmaktadır. Örneğin, genellikle doğrusal olmayan olaylar, yaklaşık olarak doğrusal modellerle ifade edilmektedir.

1.2 Elektromanyetik Uyumluluk Tarihçesi

Elektromanyetik girişim ve önlemlerinin, 1800'lerin sonlarında Marconi'nin ilk kıvılcım aralığı deneyi ile ortaya çıktığı söylenebilmektedir. 1901'de bir dizi bakır tel kullanarak ilk transatlantik iletimi sağlanmıştır. O zamanlar önemli olan tek alıcılar radyo alıcılarıydı. Bunlar az sayıdaydı ve birbirinden uzak mesafelerle ayrılmıştı. Bu nedenle girişim sorunlarının düzeltilmesi nispeten daha kolay olmaktaydı. Bununla birlikte, 1920 civarında çeşitli teknik dergilerde radyo girişimiyle ilgili makaleler görünmeye başlanmıştır. Radyo alıcıları ve antenler oldukça kabaydı ve dış kaynaklardan ya da kendi kendine indüklenen girişimlere karşı oldukça duyarlıydı. İlerleyen yıllarda gerçekleşen tasarım teknolojisindeki gelişmeler bu sorunların çoğunu iyileştirdi. 1930'larda ise elektrik motorları, elektrikli demiryolları ve elektrik işaretleri gibi elektrikli cihazlardan kaynaklanan radyo girişimi, kısa sürede büyük bir sorun olarak ortaya çıkmaya başladı.

II. Dünya Savaşı sırasında radyolar, seyrüsefer cihazları ve radar başta olmak üzere elektronik cihazların kullanımı hızlandı. Uçaklardaki radyolar ve seyrüsefer cihazları arasındaki parazit örnekleri artmaya başladı. Bunlar genellikle, kalabalık olmayan bir spektrumdaki iletim frekanslarının yeniden atanması veya kabloların bu emisyonları almasını önlemek için fiziksel olarak kabloları gürültü kaynaklarından uzaklaştırarak düzeltildi. Elektroniklerin yoğunluğu (öncelikle vakum tüplü elektronikler) bugün olduğundan çok daha az olduğundan, bu girişim çözümleri, herhangi bir elektromanyetik girişim (EMI) sorununu düzeltmek için duruma göre kolayca uygulanabilmekteydi. Bununla birlikte, girişim problemindeki en önemli artışlar, 1950'lerde bipolar transistör, 1960'larda entegre devre (IC) ve 1970'lerde mikroişlemci çipi gibi yüksek yoğunluklu elektronik bileşenlerin icatlarıyla meydana geldi. Frekans spektrumu, artan ses ve veri iletimi talebiyle daha da kalabalıklaştı. Bu, spektrum kullanımı açısından önemli bir planlama gerektirdi ve bugün de devam etmektedir.

Belki de mevcut EMC vurgusunu ön plana çıkaran birincil olay, dijital sinyal işleme ve hesaplamanın tanıtılmasıydı. 1960'ların başında dijital bilgisayarlar, anahtarlama elemanları olarak vakum tüplerini kullandılar. Bunlar (bugünün standartlarına göre) oldukça yavaştı; büyük güç tüketimi ve önemli miktarda depo alanı gerektirmekteydi.

1970'lerde entegre devre, çok daha az güç tüketen ve çok daha az fiziksel alan gerektiren bilgisayarların yapımına izin verdi. 1970'lerin sonlarına doğru analog sinyal işlemeyi dijital sinyal işleme ile değiştirme eğilimi hızlanmaya başladı. Artan anahtarlama hızı ve entegre devrelerin minyatürleştirilmesi nedeniyle neredeyse tüm elektronik işlevler dijital olarak uygulanıyordu. Hesaplama kelime işlemeye ve dijital kontrole kadar çeşitli görevlerin uygulanması yaygınlaşmış ve günümüzde de devam etmektedir. Bu, spektral içerik bakımından zengin gürültü kaynaklarının yoğunluğunun (anahtarlama dalga biçimleri) oldukça arttığı anlamına geliyordu. Sonuç olarak, EMI sorunlarının oluşumu artmaya başladı.

Tel ve radyo iletişimiyle dijital sistem etkileşiminin giderek artması nedeniyle, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Federal İletişim Komisyonu (FCC), 1979'da tüm dijital cihazların elektromanyetik emisyonlarının belirli sınırların altında olmasını gerektiren bir düzenleme yayınladı. Bu kuralın amacı, EMI vakalarının sayısını önlemek veya en azından azaltmak için çevrenin elektromanyetik kirliliğini sınırlamaya çalışmaktır. Amerika Birleşik Devletleri'nde hiçbir dijital cihaz, elektromanyetik emisyonları FCC tarafından belirlenen bu limitleri karşılamadıkça satılamayacağından, EMC konusu, dijital bilgisayarlardan elektronik daktilolara kadar ticari elektronik üreticileri arasında yoğun ilgi gördü.

Avrupa'daki ülkeler, FCC kuralını yayınlamadan çok önce dijital cihazlar için benzer gereklilikler tanımladı. 1933'te Paris'teki Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'nun (IEC) bir toplantısında, ortaya çıkan EMI sorunuyla başa çıkmak için Uluslararası Radyo Girişimi Özel Komitesi'nin (CISPR) kurulması tavsiye edildi. Komite, potansiyel EMI emisyonlarını belirlemek için ölçüm ekipmanını detaylandıran bir belge hazırladı. CISPR, 1946 yılında Londra'da bazı Avrupa ülkeleri, CISPR'ın önerilen sınırlarının sürümünü benimsemiştir. FCC kuralı, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki dijital sistemler için ilk düzenlemeydi. ABD ortamına özgü varyasyonlarla CISPR tavsiyeleri takip edilmekteydi. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki çoğu elektronik ürün üreticisi, EMI ile bağlantılı 'saha problemlerini' önlemek için ürünlerine standartlar getirmişti. Bununla birlikte, FCC kuralı, EMC gereksinimlerini gönüllü olmaktan çıkarıp yasal bir uyum meselesi haline getirdi.

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki askeri topluluk, FCC kuralını yayınlamadan önce MIL-STD-461 aracılığıyla EMI'yi önlemek için elektronik sistemlerin elektromanyetik emisyonlarına da sınırlamalar getirmişti. Bunlar 1960'ların başından itibaren yürürlükteydi ve görev başarısını garantilemek için dayatılmıştı. El matkaplarından gelişmiş bilgisayarlara kadar tüm elektronik ve elektrikli ekipmanların bu standartların emisyon limitlerini karşılaması gerekiyordu. Ordunun düzenlemelerinin bir başka yönü, bir duyarlılık şartının getirilmesi idi. Girişim sinyalleri, ekipmana bilerek uygulanmakta ve bu sinyaller varlığında ekipmanın düzgün bir şekilde çalışması gerekmekteydi. Bir elektronik ürün emisyon gerekliliklerine uygun olsa bile, yakındaki başka bir elektronik cihazla etkileşime neden olabilmekte veya emisyonlara karşı hassas olabilmektedir. Emisyon gereksinimleri sadece elektromanyetik kirliliği sınırlamaya çalışmaktadır. Duyarlılık gereksinimleri ise tüm ekipmanların elektromanyetik olarak uyumlu çalışmasını sağlamada bir adım daha öne götürmektedir.

Bu yasal düzenlemeler, EMC'yi elektronik bir ürünün pazarlanabilirliğinde kritik bir unsur haline getirmiştir. Ürün, ülke tarafından belirlenen düzenlemelere uymuyorsa, ilgili ülkede satışa sunulamamaktadır. Ürünün çok talep gören bir görevi yerine getirmesi ve müşterilerin onu satın almaya istekli olması, yasal gereklilikleri karşılamadığı durumda önemsiz olmaktadır. Bu sebeple teknolojinin gelişiminde EMC tasarımı konusunun kritik bir role sahip olduğu unutulmamalıdır (Clayton 2006).

1.3 Elektromanyetik Girişim Örnekleri

Elektromanyetik girişimin kontrol altına alınması fikri bazı genel ya da kritik öneme sahip örnekler sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu bölümde yaşanmış bazı örnekler paylaşılacaktır. Muhtemelen en yaygın örneklerden biri, bir blender, elektrikli süpürge ya da matkap gibi motor içeren bir ev aleti açıldığında televizyon ekranında çizgiler oluşmasıdır. Bu sorun, motorların fırçalarındaki arklardan kaynaklanmaktadır. Komütatör fırçalar aracılığıyla temas kurup keserken, motor sargılarındaki akım (bir indüktans) kesilmekte ve kontaklar arasında büyük bir gerilime ($L di/dt$) neden olmaktadır. Bu gerilim, Marconi kıvılcım aralığı üreticisine benzer bir durum oluşturmaktadır. Böylece geniş spektral içeriğe sahip

girişim akımı oluşturulmaktadır. Girişim akımı televizyonun AC güç kablosundan geçerek anten çıkışına bağlaşım oluşturmaktadır. Böylece görüntüde bozulma oluşmaktadır. Evlerdeki güç hatlarında oluşan girişim akımları, hatta bağlanan tüm cihazları etkileme potansiyeli barındırmaktadır. Ek olarak geniş bir kablo dizisinden oluşan bu güç hatları, verimli bir anten gibi davranarak da girişim oluşturabilmektedir.

Bir ofis ekipmanı üreticisi, yeni bir fotokopi makinesinin ilk prototipini genel merkezine yerleştirmişti. Bir yönetici, fotokopi çektiğinde salon saatlerinin bazen sıfırlandığını veya garip şeyler yaptığını fark etmişti. Sorunun, fotokopi makinesinin güç koşullandırma devresindeki silikon kontrollü doğrultuculardan (*silicon controlled rectifiers*) kaynaklandığı ortaya çıkmıştır. Bu cihazlar, DC akımı oluşturmak için AC akımını keserek anahtarlarmaktadır. Anahtarlama kaynaklı akımdaki ani değişiklik, geniş spektral içeriğe sahip gürültü akımı oluşturmaktadır. Fotokopi makinesinin AC güç kablosu da saatler gibi binadaki ortak AC güç ağına bağlanmıştır. Koridorlardaki saatler genellikle 60 Hz AC güç sinyaline uygulanan modüle edilmiş bir sinyal kullanılarak ayarlanmakta ve senkronize edilmektedir. Fotokopi makinesindeki silikon kontrollü doğrultucuların tetiklenmesinden kaynaklanan aksaklık, ortak AC güç ağı aracılığıyla saatlere bağlanmakta ve bunu bir sıfırlama sinyali olarak yorumlamalarına neden olmaktadır.

Bir otomobilin yeni versiyonunda mikroişlemci kontrollü emisyon ve yakıt izleme sistemi kurulmuştu. Bir satıcı, şehirdeki belirli bir caddeden aşağı inerken arabanın stop ettiğine dair bir şikâyet almıştı. Sokaktaki elektrik alan ölçümü, yasadışı bir FM radyo vericisinin varlığını ortaya çıkarmıştı. Bu vericiden gelen sinyaller, işlemciye giden kablolarla bağlaşım oluşturmakta ve işlemcinin kapanmasına neden olmaktadır.

Ticari bir havaalanının yakınındaki bir ofis kompleksine büyük bir bilgisayar sistemi kurulmuştu. Rastgele zamanlarda sistem verileri kaybetmekte veya yanlış kaydetmekteydi. Yapılan incelemeler sonrasında sorunun kaynağının havaalanı gözetleme radarı olduğu ortaya çıkmıştı. Bilgisayar odasının ekranlama etkinliğinin artırılması girişimi engellemiştir.

1982 yılında Birleşik Krallık ve Arjantin Falkland Adaları savaşında karşı karşıya gelmişti. Kraliyet donanmasına ait HMS Sheffield destroyerinde füze tespit sistemi ve uydu haberleşme sistemi girişim yapmaktaydı. Bu nedenle Birleşik Krallık ile iletişim kurarken füze tespit sistemi kapatılmıştı. Aynı ana denk gelen Arjantin tarafından atılan Exocet füzesi ile destroyer kaybedilmiştir.

ABD Ordusu, UH-60 Black Hawk olarak adlandırılan bir saldırı helikopteri satın almıştı. 8 Kasım 1988 Pazar günü, çeşitli haber ajansları helikopterin elektromanyetik emisyonlara duyarlı olduğunu bildirmişti. Kara Şahin'in 1982'den bu yana 22 askerin ölümüne neden olan kazalarının çoğunda, radar vericilerine, radyo vericilerine çok yakın uçmaktan kaynaklandığını gösteren kanıtlar ortaya çıkmıştı. Helikopterin elektronik kontrollü uçuş kontrol sisteminin elektromanyetik emisyonlara duyarlılığının bu kazalara neden olduğu düşünülmektedir.

29 Temmuz 1967'de ABD uçak gemisi Forrestal, Kuzey Vietnam kıyılarında konuşlandırılmıştı. Taşıyıcı güverte, havadan havaya ve havadan yere füzelerin yanı sıra 1000 pound (*libre*) bombalarla beslenen ve yüklenen çok sayıda saldırı uçağı içermektedir. Uçakta bulunan füzelerinden biri yanlışlıkla ateşlenmiş ve başka bir uçağı çarparak yakıt tanklarının patlamasına yol açmıştı. Sonrasında arka arkaya gelen füze ateşlemeleri 134 askerin ölümüne neden olmuştu. Sorunun, zayıf bağlanmış ekran iletkeni üzerinde yüksek güçlü arama radarı tarafından oluşturulan gerilim kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Yukarıda yoğun elektronik dünyamızdaki birçok EMI örneğinden birkaçını ifade edilmektedir. Hayatı tehdit eden olaylarda çok açık bir şekilde çözüme ihtiyaç duyulmaktadır. Bir bilgisayarda yalnızca rahatsızlık veya veri kaybıyla sonuçlanan olaylarsa dramatik olmasa da yaşam kalitesini düşürücü etkiye sahiptir ve çözüm gerektirmektedir. Sonraki bölümlerde sorunların çoğunu çözen tasarım ilkeleri tartışılacaktır.

1.4 Ekranlama Etkinliği

Ekranlama, uzayda iki bölge arasına yerleştirilmiş metalik bir bölme olarak tanımlanmaktadır (Ott 2009). Elektromanyetik alanların bir bölgeden diğerine yayılmasını kontrol etme amacıyla kullanılmaktadır. Hassas bir devreyi korumak ya da gürültülü bir devreyi çevreleyerek elektromanyetik alanların yayılmasını engellemek için kullanılabilir. Böylece ekranın dışında bulunan tüm hassas ekipmanlar için koruma sağlanmaktadır. Genel bir sistem açısından bakıldığında, gürültü kaynağının ekranlanması, alıcının korunmasından daha verimli olmaktadır.

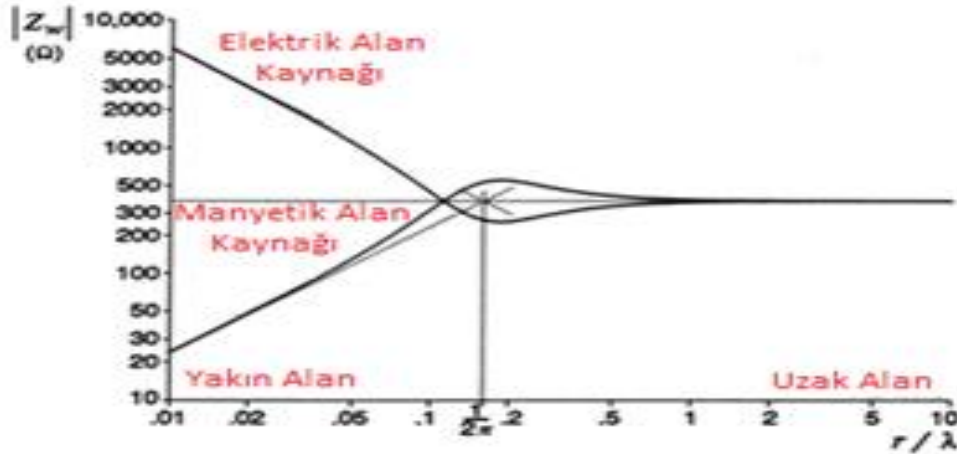
1.4.1 Yakın alan ve uzak alan

Elektromanyetik alanın özellikleri, kaynak, kaynak etrafındaki ortam ve kaynak ile ölçüm noktası arasındaki uzaklık tarafından belirlenmektedir. Kaynağa elektriksel olarak yakın bölgede, elektromanyetik alana ait özellikler, öncelikle kaynak tarafından belirlenmektedir. Kaynağa elektriksel olarak uzak bölgede ise alanın özellikleri esas olarak yayılma ortamına bağlı olmaktadır. Bu nedenle, bir radyasyon kaynağını çevreleyen boşluk, yakın alan ve uzak alan olarak iki bölgeye ayrılabilir. Kaynağa yakın bölge, yakın veya indüksiyon alanı olarak tanımlanmaktadır. Dalga boyunun 2π 'ye bölünmesinden ($\lambda/2\pi$) daha büyük bir mesafe ise uzak veya radyasyon alanı olarak ifade edilmektedir. $\lambda/2\pi$ civarındaki bölge, yakın ve uzak alanlar arasındaki geçiş bölgesidir.

Dalga empedansı elektrik alan ve manyetik alan oranı olarak tanımlanmaktadır. Elektriksel olarak uzak alanda, dalga empedansı serbest uzay empedansına eşit olmaktadır ($|\mathbf{E}/\mathbf{H}| = Z_0 = 377\Omega$). Yakın alanda dalga empedansı, kaynak özelliklerine ve mesafeye göre belirlenmektedir. Kaynakta akım baskın ise ($|\mathbf{E}/\mathbf{H}| < 377\Omega$) yakın alan ağırlıklı olarak manyetik alan olmaktadır. Ters durumda kaynakta gerilim baskın ise ($|\mathbf{E}/\mathbf{H}| > 377\Omega$) baskın olan elektrik alan olmaktadır.

Bir rod ya da düz tel anten olarak kullanıldığında kaynak empedansı yüksek olmaktadır. Dolayısıyla antenin yakınındaki alanın empedansı da yüksek olmaktadır. Mesafe arttıkça, elektrik alanı tamamlayan manyetik alan oluşmakta elektrik alan yoğunluğu

azalmaktadır. Yakın alanda elektrik alan ($1/r^3$) oranında, manyetik alan ise ($1/r^2$) oranında zayıflamaktadır. Böylece, düz tel antenden gelen dalga empedansı, mesafe ile azalmakta ve uzak alandaki boş uzayın empedansına asimptotik olarak yaklaşmaktadır.

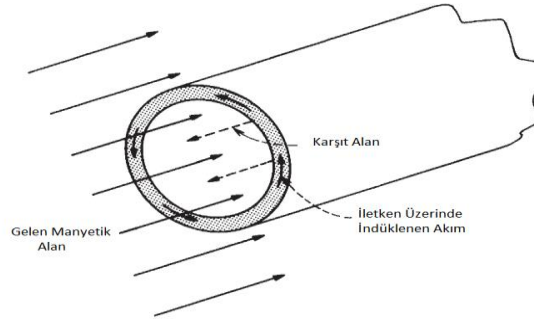


Şekil 1.5 Dalga Empedansının Kaynak ile Aradaki Mesafe ile Değişimi

Bir halka anten tarafından üretilen elektromanyetik dalga ise ağırlıklı olarak manyetik alandan oluşmakta ve yakınındaki dalga empedansı düşük olmaktadır. Kaynaktan uzaklaştıkça manyetik alan ($1/r^3$) oranında, elektrik alanı ise ($1/r^2$) oranında zayıflamaktadır. Bu nedenle dalga empedansı mesafe ile artmakta ve $\lambda/2\pi$ mesafesinde boş uzaydaki dalga empedansına yaklaşmaktadır. Uzak alan şartlarında ise elektrik ve manyetik alanlar doğrusal olarak $1/r$ oranında azalmaktadır.

1.4.2 Ekranlama etkinliği bileşenleri

Hem yakın hem de uzak alanlardaki ekranlama etkinliğini tartışmak için ekranlama etkinliğini oluşturan bileşenlerden bahsetmek gerekmektedir. Ekranlama etkinliği birçok farklı şekilde analiz edilebilmektedir. Şekil 1.6'da devre teorisi yaklaşımı gösterilmektedir. Devre teorisi yaklaşımında, gelen alanlar ekran iletkeni üzerinde akımları indüklemekte ve bu akımlar da uzayın belirli bölgelerinde orijinal alanı zayıflatan ek alanlar üretmektedir.



Şekil 1.6 Manyetik Alana Karşı Ekranlama Örneği

Diğer bir yaklaşım ise S.A. Schelkunoff tarafından geliştirilmiştir (Schelkunoff 1943). Schelkunoff'un yaklaşımı, ekranlamayı hem kayıp hem de yansıma bileşenleriyle bir iletim hattı sorunu olarak ele almaktır. Kayıp, ekran içinde üretilen ısıdır ve yansıma, gelen dalga ile ekran empedansı arasındaki empedans farkının sonucudur. Ekranlama, koruma sebebiyle oluşan manyetik ve elektrik alanların şiddetindeki düşüş olarak belirtilebilmektedir. İki aynı birimin oranı olarak ifade edildiğinden ekranlama değerini dB şeklinde ifade etmek uygun olmaktadır. Ekranlama etkinliği (SE), elektrik alanları için şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$SE (dB) = 20 \log \frac{E_0}{E_1} \quad (1.1)$$

Manyetik alanlar için de aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$SE (dB) = 20 \log \frac{H_0}{H_1} \quad (1.2)$$

Burada E_0 (H_0) gelen alan şiddeti ve E_1 (H_1), iletilen dalganın ekrandan çıkarken sahip olduğu alan şiddetidir. Ekranlı bir mahfazanın tasarımında iki ana unsur bulunmaktadır:

Malzemenin kendisinin ekranlama etkinliği

Süreksizlikler ve açıklıklardan kaynaklanan ekranlama etkinliği.

Ekranlama etkinliği frekansa, ekran geometrisine, alanın ölçüldüğü konuma, zayıflatılan alan tipine, geliş açısına ve polarizasyona göre değişmektedir. Metalik bir yüzeye çarpan bir elektromanyetik dalga iki tür kayıpla karşılaşmaktadır. Dalga yüzeyden kısmen

yansıtılmakta ve dalganın iletilen (yansıtılmayan) kısmı ekrandan geçerken zayıflamaktadır. Bu durum soğurma veya penetrasyon kaybı olarak tanımlanmakta, yakın ve uzak alan şartlarında hem manyetik hem de elektrik alanlar için aynı olmaktadır. Ancak yansıma kaybı, alanın tipine ve dalga empedansına bağlı olarak değişmektedir. Deliksiz katı bir malzemenin toplam ekranlama etkinliği, soğurma kaybının (A), yansıma kaybının (R) ve ince kalkanlardaki çoklu yansımaları hesaba katan bir düzeltme faktörünün (B) toplamına eşittir. Toplam ekranlama etkinliği aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir:

$$SE = A + R + B \text{ (dB)} \quad (1.3)$$

Çoklu yansıma faktörü olan B , elektrik alan, düzlem dalga ve soğurma katsayısının yeterince büyük olduğu durumlarda ihmal edilebilmektedir (Ott 1988).

1.4.3 Soğurma kaybı (A)

Elektromanyetik dalga ortam değiştirirken, alan şiddeti Şekil 1.7'deki gibi üstel olarak azalmaktadır (Hayt ve Buck 2017). Bu bozulma, ekranda indüklenen akımların omik kayıplara (*ohmic loss*) ve malzemenin ısınmasına yol açması nedeniyle oluşmaktadır. Buna göre:

$$E_1 = E_0 e^{-t/\delta} \quad (1.4)$$

Ve

$$H_1 = H_0 e^{-t/\delta} \quad (1.5)$$

Şeklinde yazılabilmektedir. Burada $E_1(H_1)$, ekran içinde t mesafesindeki elektrik (manyetik) alan şiddetidir. Dalganın $1/e$ veya orijinal değerinin %37'sine kadar zayıflaması için gerekli olan mesafe, deri kalınlığı (*skin depth*) olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

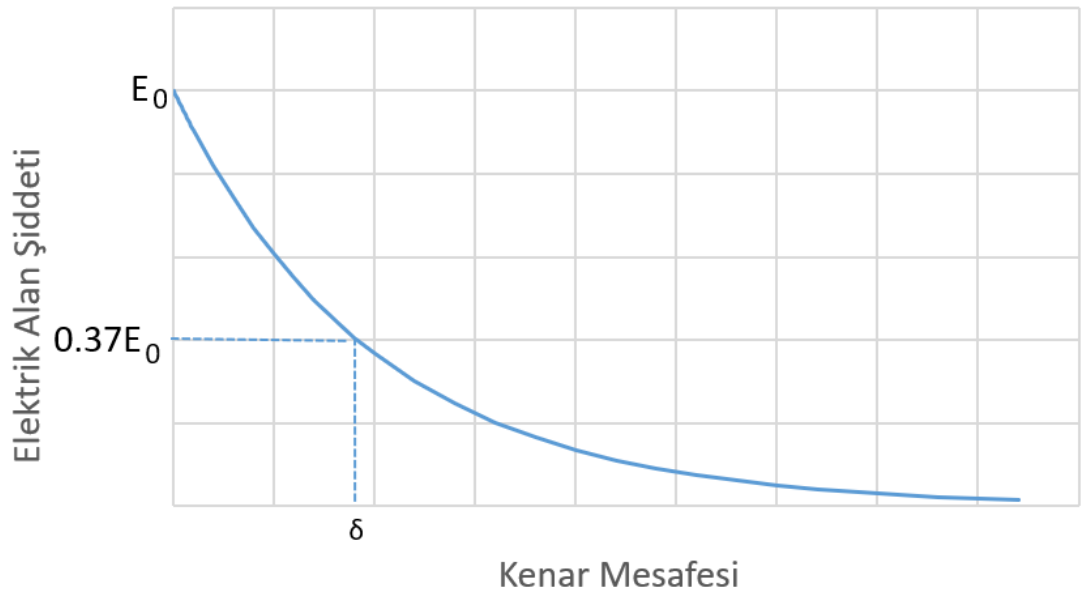
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.6)$$

Bir ekran üzerinden soğurma kaybı ise aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$A = 20 \log \frac{E_0}{E_1} = 20 \log(e^{t/\delta}) \quad (1.7)$$

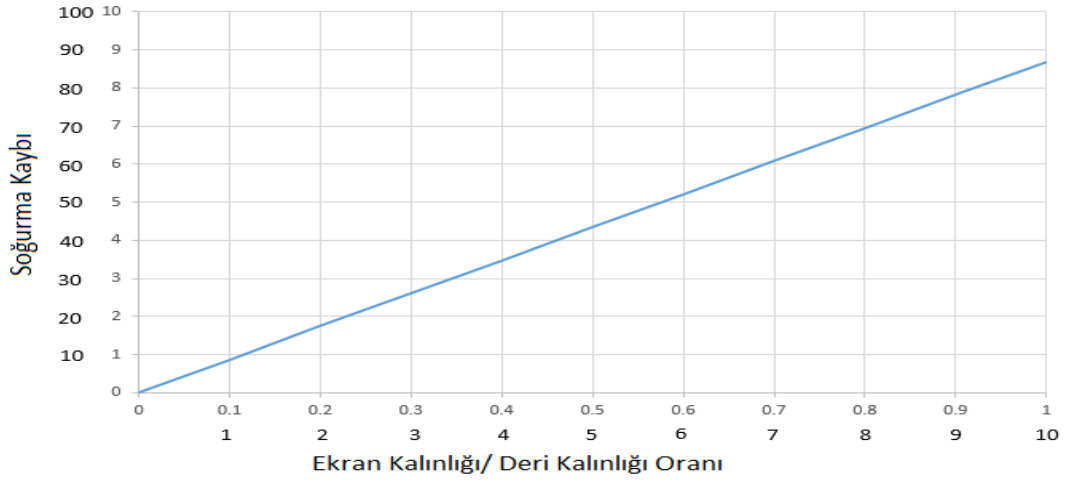
$$A = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log(e) \quad (1.8)$$

$$A = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) (dB) \quad (1.9)$$



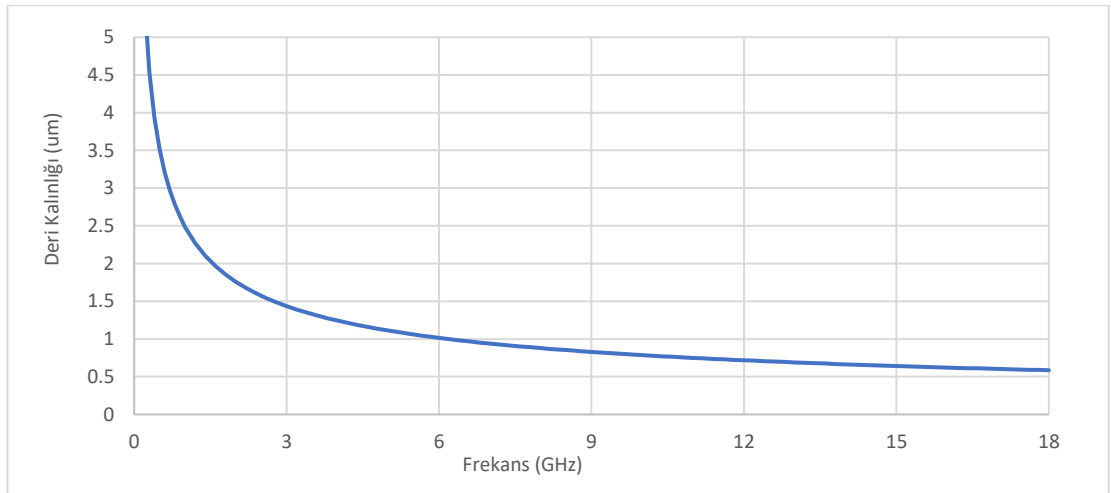
Şekil 1.7 Soğurucu Malzeme içinde Mesafe ile Elektrik Alan Değişimi

Yukarıdaki denklemden de görüldüğü gibi 1 deri kalınlığındaki ekran için soğurma kaybı yaklaşık olarak 9 dB'dir. Kalınlığın 2 katına çıkması, soğurma kaybının 2 katına çıkmasına sebep olmaktadır. Şekil 1.8'de bu değişim grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu eğri düzlem dalgalar, elektrik ve manyetik alanlar için geçerlidir (Ott 2009).



Şekil 1.8 Soğurma Kaybının Deri Kalınlığına Oranı

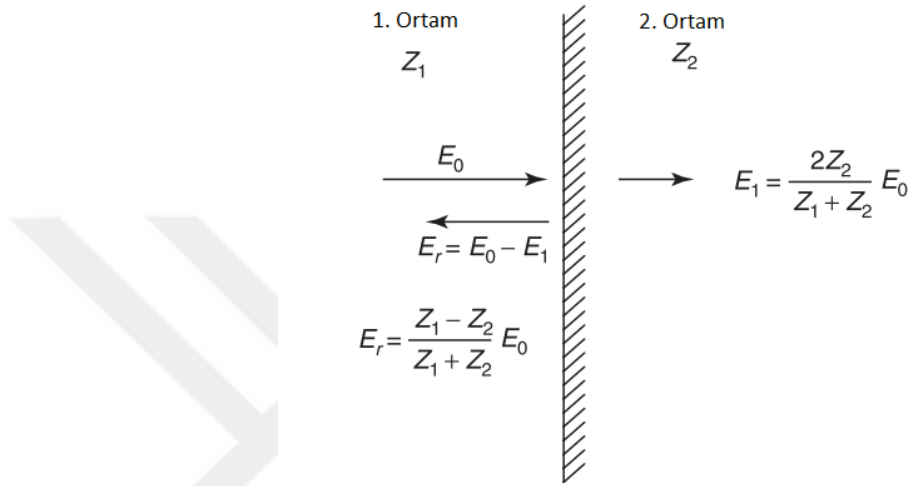
Soğurma kaybı malzemenin iletkenliğine, manyetik geçirgenliğine ve frekansa bağlı olarak değişen bir parametredir. 1000 Hz gibi düşük frekanslarda soğurma kaybı elde edebilmek için oldukça kalın malzemeler kullanılması gerekmektedir. Diğer bir dikkat çekici durum ise manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemelerin, bakır gibi iyi iletkenlerden daha fazla soğurma kaybına sebep olmasıdır. Şekil 1.9’da altının frekansa göre değişen deri kalınlığı grafiği paylaşılmıştır. Buna göre 18 GHz’e kadar 500 nm üzerinde deri kalınlığına sahip olmaktadır. Soğurma kaybı önemli bir parametre olsa da özellikle iyi iletkenler için ulaşılması zor kalınlıklarda uygulama gerektirmektedir. 5. Bölümde bu konudan daha detaylı bahsedilecektir.



Şekil 1.9 Altının Frekansa Göre Değişen Deri Kalınlığı

1.4.4 Yansıma kaybı (R)

Farklı ortamlar arasında meydana gelen yansıma kaybı, karakteristik empedanslar farkları ile ilişkili olmaktadır. Z_1 empedanslı bir ortamdan Z_2 empedanslı bir ortama iletilen dalganın şiddeti aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Ott 2009):



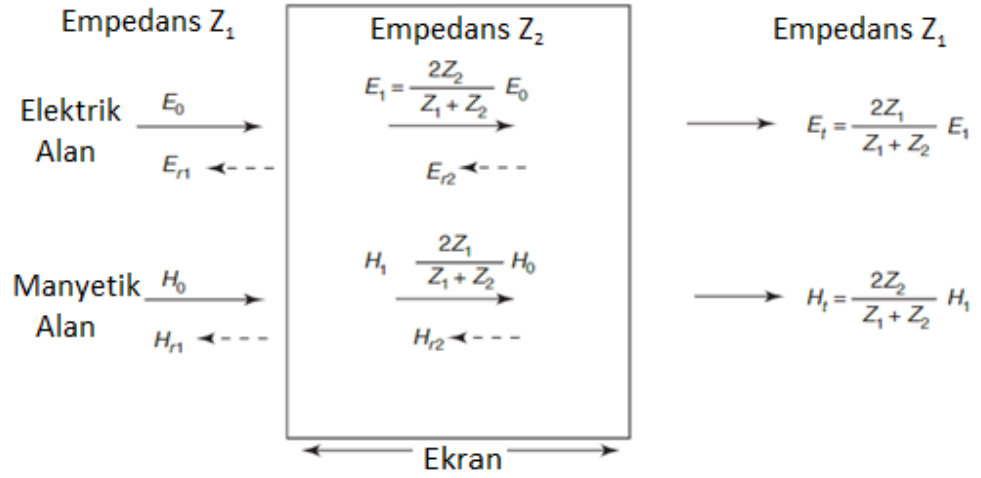
Şekil 1.10 Gelen Elektromanyetik Dalga, Yansıyan Dalga ve İletilen Dalga

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad (1.10)$$

$$H_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0 \quad (1.11)$$

E_0 (H_0) gelen dalganın elektrik (manyetik) alan şiddeti, E_1 (H_1) ise iletilen dalganın elektrik (manyetik) alan şiddetini ifade etmektedir.

Elektromanyetik dalga bir ekrandan (*shield*) geçerken, aşağıda gösterildiği gibi iki sınırla karşılaşmaktadır. İkincil sınır Z_2 empedanslı bir ortam ile Z_1 empedanslı ortam arasında oluşmaktadır. Bu durumda elektrik ve manyetik alanlar aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:



Şekil 1.11 Ekran Sınırlarında Oluşan Kısmi Yansıma ve İletim

$$E_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_0 \quad (1.12)$$

$$H_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} H_0 \quad (1.13)$$

Elektrik ve manyetik alanlar her sınırda da farklı şekilde yansımaya uğrasa da net etki her iki alan için de aynı olmaktadır. Ekran metalik ve ekranı çevreleyen alan yalıtkan ise $Z_1 \gg Z_2$ olmaktadır. Bu durumda, en büyük yansıma, elektrik alan için dalganın ekrana girdiği ortamda, manyetik alan içinse dalganın ekrandan çıkışı durumunda olmaktadır. Elektrik alan durumu için birincil yansıma yüzeyde olduğu için, çok ince malzemeler dahi yüksek yansıma kaybı sağlayabilmektedir. Manyetik alan durumunda ise birincil yansıma ikinci yüzeyde olmakta ve ekran içindeki çoklu yansımalar ekranlama etkinliğini önemli ölçüde azaltabilmektedir. $Z_1 \gg Z_2$ durumunda:

$$E_t = \frac{4Z_2}{Z_1} E_0 \quad (1.14)$$

$$H_t = \frac{4Z_2}{Z_1} H_0 \quad (1.15)$$

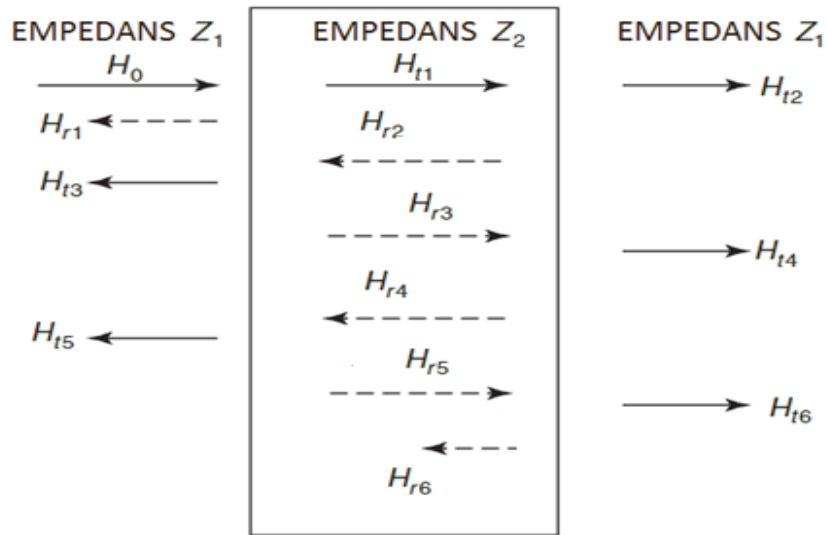
Dalga empedansı olan Z_1 yerine Z_w ve ekran empedansı olan Z_2 yerine Z_s yazıldığında ve çoklu yansımalar ihmal edildiğinde, yansıma kaybı aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$R = 20 \log \frac{E_0}{E_1} = 20 \log \frac{Z_1}{4Z_2} = 20 \log \frac{|Z_w|}{|4Z_s|} \text{ dB} \quad (1.16)$$

Yukarıda verilen yansıma kaybı denklemleri, düzlem dalga durumu ve dik geliş açısı varsayımlarını kullanmaktadır. Dalga farklı bir açıyla geldiğinde, yansıma kaybı geliş açısıyla birlikte artmaktadır (Ott 2009).

1.4.5 Düzeltme faktörü (B, çoklu yansımalar)

Ekran ince ise, ikinci sınırdan yansıyan dalga ilk sınırdan tekrar yansımakta ve ardından aşağıda gösterildiği çoklu yansıma durumu oluşmaktadır. Elektriksel olarak kalın bir malzeme kullanıldığında, bu etki ihmal edilebilmektedir çünkü soğurma kaybı yüksek olmaktadır. Dalga ikinci kez ikincil sınırı ulaştığında, ekran içinde 3. kez ilerlediği için genliği ihmal edilebilir bir seviyeye düşmektedir.



Şekil 1.12 İnce Ekran Durumunda Oluşan Çoklu Yansıma

Elektrik alan için, gelen dalganın çoğu birincil sınırdan yansıtılmakta ve ekran içine küçük bir yüzdesi nüfuz etmektedir. Bu durum yukarıdaki denklemlerden de

gözlemlenebilmektedir. Diğer bir ifadeyle, elektrik alan durumunda ekranda meydana gelen ardışık yansımalar göz ardı edilebilmektedir. Manyetik alan koşulunda ise elektromanyetik dalganın büyük bir kısmı, ekranın birincil sınırından geçmektedir. İletilen dalganın büyüklüğü aslında gelen dalganın iki katı olmaktadır. Ekran içinde yüksek seviyede bir manyetik alan olduğunda, çoklu yansımaların etkisi dikkate alınmalıdır. Manyetik alanlar için düzeltme faktörü aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$B = 20 \log (1 - e^{-2t/\delta}) \quad (1.17)$$

Bu ifadede dikkat çeken bir nokta da pozitif kalınlık (t) ve deri kalınlığı (δ) değerleri için negatif sonuç vermesidir. Yansıma kaybı ve soğurma kaybı değerlerinin tersine düzeltme faktörü ekranlama etkinliğine azaltıcı etki yapmaktadır.

Z_1 empedanslı bir ortamdan Z_2 empedanslı bir ortama iletilen dalganın şiddeti ise gelen dalga bakımından aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Ott 2009):

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad (1.18)$$

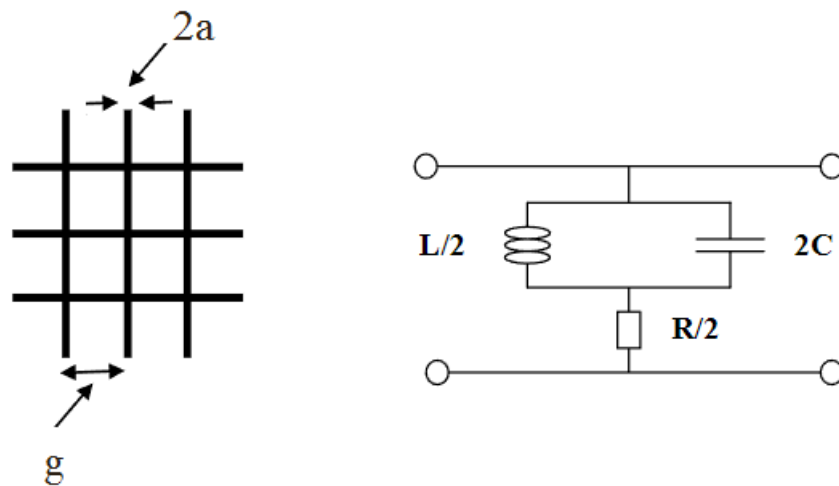
$$H_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} H_0 \quad (1.19)$$

1.5 Ulrich Metodu

Bu çalışmada en etkili yöntemin metalik ağ yapıları olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle bu yapıların daha detaylı çalışılması amaçlanmıştır.

Metalik ağ yapıları ya da periyodik yüzeyler ilk defa 1919 yılında Marconi ve Franklin tarafından belgelenmiştir (Marconi ve Franklin 1914). Bu patentte tamamen metalik bir yapı yerine sonlu uzunluktaki çubuklardan oluşan bir yansıtıcıdan bahsedilmektedir. Marcuvitz ise dalga kılavuzlarını kullanarak indüktif ve kapasitif yapıdaki bu yüzeyleri tanımlamıştır (Marcuvitz 1986). Metalik ağ yapılarının eşdeğer devre modeli tanımı ise Ulrich tarafından yapılmıştır (Ulrich 1967). Ulrich bu yapıları indüktans, kapasitans ve direnç üzerinden ifade etmiştir. Reaktans kısmına ait formüller deneyler ile

doğrulandığından bu çalışmada da kullanılan ifadeler oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ulrich, metalik ağ yapılarının λ uzunlukta tamamen geçirgen olacağı varsayımıyla eşdeğer devre modeline kapasitans eklemiştir ve sonuçları yorumlamıştır. Sonrasında bu formüller dielektrik alttaşı üzerine uygulanan ağ yapıları için Whitbourn ve Compton tarafından düzeltilmiştir (Whitbourn ve Compton 1985). İlerleyen dönemlerde metalik ağ yapılarının analizi için başka yöntemler (Chen 1970), (Chen 1971), (Saksena vd. 1969) de ortaya konulmuştur. Bu yöntemler ileriki yıllarda karşılaştırılmıştır (Durschlag ve Detemple 1981). Chen'in ortaya koyduğu ve Floquet Modlarının kullanımını içeren analiz yöntemi en başarılı olan yöntem olarak belirlenmiştir. 1980'lerin başında metalik ağ yapılarının iletim ve yansıma özelliklerinin analizini gerçekleştirmek amacıyla bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program Chen'in belirttiği yöntemi kullanmaktaydı çünkü Durschlag ve DeTemple tarafından yapılan analizlerde en başarılı yöntem olarak öne çıkmıştı. İtek tarafından geliştirilen bu yazılım 200 serbest uzay Floquet modunun ve 14 açıklık dalga kılavuzu modunun analizine dayanmaktaydı. Chen tarafından önerilen bu metot, daha kolay sonuca ulaşan Ulrich metodu gibi metotlarla karşılaştırılmıştı. Sonuç olarak mesh periyodundan 2 kat ve daha fazla dalga boyuna sahip frekanslarda Chen metodunun kullanılmasına gerek olmadığı raporlanmıştı (Kohin vd. 1993). Ulrich yönteminin basit yapısı, ayrıca teoremin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle birçok araştırmaya konu olmuştur.



Şekil 1.13 Metalik Ağ Yapısı ve Eşdeğer Devre Modeli (Ulrich 1967)

Şekil 1.13'te Ulrich yönteminde kullanılan eşdeğer devre modeli ve metalik ağ yapısı gösterilmektedir. Burada g , ağ periyodunu, $2a$ çizgi genişliğini, t ise kalınlığı ifade etmektedir. R_{mesh} , C_{mesh} ve L_{mesh} ise iletim hattı teorisine göre hesaplanan direnç, kapasitans ve indüktans değerlerini ifade etmektedir. Düşük frekans ve düzlem dalga durumunda ağ yapısı sürekli metalik bir yüzey gibi davranmaktadır. Sürekli metalik yüzeyler için ekranlama etkinliği önceki bölümde bahsedildiği gibi soğurma ve yansıma kaybı üzerinden tanımlanmaktadır. Film deri kalınlığından daha kalın olduğunda soğurma kaybından bahsedilebilmektedir. Aksi durumda sadece yansıma kaybı ortaya çıkmaktadır. Metal filmin deri kalınlığından ince olduğu durumda sadece DC direnç üzerinden ekranlama etkinliği hesaplanabilmektedir. Bu nedenle eşdeğer devre modelinde deri kalınlığı önemli bir parametre olmaktadır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.20)$$

f : düzlem dalga frekansı

μ : manyetik geçirgenlik

σ : iletkenlik değeri (yığm)

Yukarıdaki formülden de görüldüğü gibi frekans arttıkça deri kalınlığı azalmaktadır. İletken bir film için yüzey direnci aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Hansen ve Pawlewicz 1982):

$$R_{DC_film} = \frac{1}{\sigma t} \quad (1.21)$$

Metalik bir ağ yapısı durumunda periyot ve çizgi genişliği değerleri de hesaba katılmaktadır:

$$R_{DC_mesh} = \frac{1}{\sigma t} \frac{g}{2a} \quad (1.22)$$

Burada belirtilen formül ise sadece düşük frekanslarda ve ağ yapısı kalınlığının deri kalınlığından çok daha düşük olduğu durumlarda kullanılabilmektedir. Fakat deri

kalınlığının ağ yapısı kalınlığına yakın olduğu ve frekansa bağlı çözüm gerektiren durumlarda kullanılamamaktadır. Deri kalınlığı değeri frekansla birlikte azaldığından yüksek frekanslarda analiz gerektiğinde deri kalınlığı da hesaba katılmalıdır. Metal yüzeyler ortalama serbest elektron yolu uzunluğuna yakın olduğunda ise iletkenlik hızla düşmektedir. Bu fenomenin ana nedeni, dış yüzeyde ve kristal sınırında meydana gelen elektron saçılması olarak açıklanmaktadır (Sondheimer 1952). Modellerde ek öz direncin katkısı, yığın öz direncine, elektron saçılımından kaynaklanan ortalama serbest yola ve karşılık gelen uzunluk ölçeğine bağlıdır. En düşük kütle öz direncine ve ortalama serbest yol uzunluğu çarpımına ($\rho_0\lambda$) sahip metal, ultra ince yapılar için en uygun seçim olmaktadır (Gall 2016).

Bu sebeple frekans bağlı bir direnç modeli için bu etkilerin de modellenmesi gerekmektedir. Aşağıdaki formülde deri kalınlığı ve ortalama serbest elektron uzunluğu parametrelerinin eklendiği film direnci modeli ifade edilmektedir (Liu ve Tan 2013):

$$R_{film} = \frac{1}{\sigma\delta(1 - e^{-t/\delta})} \quad (1.23)$$

Metalik ağ yapıları içinse ağ parametresinin modele dahil edilmesi ile eşdeğer yüzey direnci ifade edilebilmektedir (Liu ve Tan 2013):

$$R_{film} = \frac{1}{\sigma\delta(1 - e^{-t/\delta})} \frac{g}{2a} \quad (1.24)$$

Ulrich tarafından deneysel olarak ortaya konulan reaktans modeli ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Ulrich 1967):

$$X_{mesh} = Z_0 \frac{-g}{\lambda} \left[\ln \left(\sin \frac{\pi a}{g} \right) \right] \quad (1.25)$$

Soğurma kaybının ihmal edildiği durumda ekranlama etkinliği ise aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{R_{mesh} + iX_{mesh}}{Z_0 + R_{mesh} + iX_{mesh}} \right) \quad (1.26)$$

Z_0 : Serbest Uzay Empedansı

Bu çalışmada da metalik ağ yapılarının ızgara çeşitleri analiz edilirken Ulrich'in önerdiği reaktans modeli ve Liu'nun önerdiği direnç modeli kullanılmıştır.

1.6 Tezin Özgün Tarafları

Bu tez kapsamında 1 adet SCIE uluslararası makale yayımı ve 1 adet patent başvurusu gerçekleştirilmiştir. Yayına hazırlanan ve hakem onayı bekleyen makaleler de mevcuttur. SCIE makalesinde (Günay vd. 2021) yüzey iletkenliği sağlayan 4 yöntem ekranlama etkinliği ve optik geçirgenlik parametreleri bakımından karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin tasarım ve üretim parametrelerine ve birbirine göre üstünlüklerine yer verilmiştir. Yapılan patent başvurusunda (Günay vd. 2022) ise empedans uyumlandırması sağlayan bir busbar yapısından bahsedilmiştir. Geri yansımaları azaltmak için 2 farklı yöntem ortaya konmuştur.

1.7 Tezin Organizasyonu

Bu tez kapsamında 2. Bölümde elektriksel olarak iletken, optik olarak geçirgen yapı tasarımı yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan ITO kaplamaya değinilmiştir. Kaplamanın yapısına ve içeriğine değinilmiştir. Sonrasında üretilen kaplamanın ekranlama etkinliği ve optik geçirgenlik verileri paylaşılmıştır.

3. Bölümde Grafen kaplamalar hakkında literatürde paylaşılan veriler bir araya getirilmiştir. Kaplamanın mevcut performansı ve iyileştirilmesi gereken yönleri aktarılmıştır.

4. Bölümde ise Metal Nano Kaplamalarda yüzey direnci değişiminin bağlı olduğu parametrelerden bahsedilmiştir. Üretilen gümüş nano kaplama örneğinin ekranlama etkinliği ve optik geçirgenlik performansı paylaşılmıştır.

Metalik ağ yapılarının genel özellikleri 5. Bölümde anlatılmıştır. Birim optik geçirgenlik kaybı başına elde edilen en yüksek ekranlama etkinliği değeri metalik ağ yapılarında elde

edildiği için sonraki bölümlerde de bu yapı temel alınarak araştırma yapılmıştır. 6. Bölümde Metalik Ağ Yapısı üretim teknolojilerinden bahsedilmiştir. Teknolojilerin mevcut limitleri ve oluşması muhtemel hatalar örnekler üzerinde anlatılmıştır.

7. Bölümde ise Ölçüm Yöntemlerine yer verilmiştir. Yöntemlerin limitlerini belirleyen parametrelerden bahsedilmiştir. Birbirine göre avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.

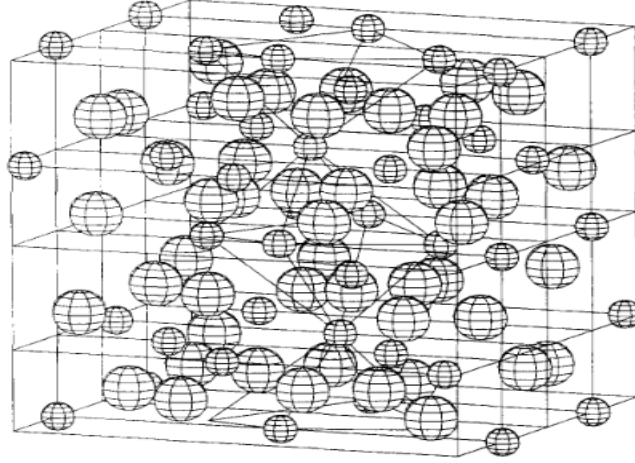
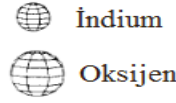
8. Bölümde ise Metalik Ağ Yapısında tasarımında kullanılabilecek optimizasyon yöntemleri anlatılmıştır. Bu yöntemler 9. Bölümde CST MWS programında kullanılmıştır.

9. Bölüm olan Sonuç bölümünde ise üretilen Metalik Ağ Yapısı örnekleri matematiksel analiz, Floquet Port ve gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır. İhtiyaç duyulan ekranlama etkinliği ve frekans bilgilerine göre hangi üretim teknolojisinin seçilebileceği aktarılmıştır. Elektromanyetik dalganın geliş açısına göre ekranlama etkinliği değişiminden bahsedilmiştir. Kırınım etkisi görünür ve orta dalga kıızılötesi bantlarda analiz edilmiş ve ölçüm sonuçları paylaşılmıştır. Son olarak tez kapsamında yer alan elektriksel olarak iletken, optik olarak geçirgen yapı tasarımı yöntemleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. ITO KAPLAMA

Katkılı metal oksit ailesi, optik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik gerektiren uygulamalar için en yaygın kullanım alanına sahiptir. Geniş bant boşlukları nedeniyle transparan, donör seviyesinin iletim bandına yakın olması sebebiyle iletken olan bu malzemeler 50 yılı aşkın süredir araştırılmaktadır (Edwards vd. 2004). Bu nedenle sonuçlar ve uygulamalar bakımından olgun bir yapıdadırlar. Transparan metal oksitler ilk olarak 1930'lu yıllarda Corning laboratuvarında yapılan deneyler sonucu belgelenmiştir (ABD patent 2118795). Bu çalışmaların devamında 1940'lı yıllarda (2564707 numaralı ABD patent) indiyum ve kalay oksitin karışımından açıkça bahsedilmiştir. Gece mavisi rengin baskınlığını azaltmak için antimon katkılama azaltılmıştır. İlerleyen yıllarda üretim teknikleri geliştirilerek ürünlerde kullanımı yaygınlaştırılmıştır. Metal oksitler ile bağlantılı olan iletken polimerler poliasetilenin keşfedilmesinden sonra ortaya çıkmıştır. Temel monomerler (anilin, pirol, tiyofen) 1800'lerde, polianilin 1834'te keşfedilse de yalıtkan olan bu yapıları katkılama ile iletken hale getirebilme 1970'li yıllarda mümkün olmuştur. Metal oksit ailesi 20. yüzyılda oldukça geniş bir uygulama alanı bulsa da 21. yüzyılda nano malzemelerdeki hızlı gelişmeler karşısında etkinliğini yitirmiştir. İndiyum kaynaklarının giderek azalması, görünür bant ve yakın komşuluğu dışında optik geçirgenliğin hızlıca azalması gibi dezavantajları olsa da geleneksel uygulamalardaki kullanım alanları düşünülerek bu çalışmada ITO kaplamalar araştırılmaya değer bulunmuştur (Hecht vd. 2011).

ITO'nun benzersiz özellikleri yapısından ve bileşiminden kaynaklanmaktadır. İndiyum oksit Şekil 2.1'de de gösterildiği gibi kübik bir bixbit (bixbyite) yapısına sahiptir. Bir birim hücre 16 adet In_2O_3 içermekte, dolayısıyla In_2O_3 kristali 80 adet atomdan oluşmaktadır (Greene 2010). Teorik olarak yoğunluğu 7.12 g/cm^3 olarak belirtilmektedir (Ederth 2003). Malzeme özelliklerini değiştirmek için In_2O_3 kristali kalay ile katkılanabilmektedir. Kalay atomları indiyum atomlarının yerini aldığı malzeme yapısı bozulmadan SnO ya da SnO_2 oluşmaktadır. Fakat katkılama seviyesi aşırı yüksek olduğunda kafes yapısı bozulabilmektedir. Çok kristalli bir yapıda olması dolayısıyla, ITO kristali tane boyutu, alttaş sıcaklığı ve biriktirme hızı gibi proses parametrelerine bağlı olarak değişebilmektedir.



Şekil 2.1 In_2O_3 Kristal yapısı (Elfallal vd. 1993)

Temel olarak ITO ağır katkılı bir yarı iletken olarak tanımlanmaktadır. Katkılanmamış In_2O_3 kristali bant aralığı 3.75 eV olarak raporlanmaktadır (Gupta vd. 1989). Kristal yapısındaki oksijen boşlukları nedeniyle In_2O_3 kristali genellikle ideal olmamaktadır. Oksijen boşlukları indiyum oksitin iletim mekanizmasını belirlemektedir ve serbest yük taşıyıcı konsantrasyonunun 10^{19} - 10^{20} cm^{-3} aralığında olduğu belirtilmektedir (Green 2009). Kalay katkılama ise indiyum oksitin elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Kalay atomları ile In_2O_3 katkılандığında indiyumun yerini kalay almaktadır. Bu durumda değerliğe (valance) bağlı olarak kalay oksit ya da kalay dioksit oluşmaktadır. Kalay oksit kalayın bir elektron kabul etmesiyle meydana gelmektedir. Fakat kalay dioksit oluşurken elektron verme işlevini yerine getirmektedir. Genelde kalay dioksit dominant olduğu için donör işlevi görmektedir. Kalayda ve oksijende bulunan boşluklar ITO'nun iletkenliğinin artmasını sağlamaktadır (Green 2009).

Katkılama işlemi aslında iletkenlik değerini artırma amacıyla yapılmaktadır. Kalay yoğunluğu arttıkça doygunluk seviyesine kadar taşıyıcı yoğunluğu da artmaktadır. Fakat doyma seviyesi üzerindeki kalay yoğunluğu, serbest taşıyıcı konsantrasyonunda azalmaya sebep olmaktadır. Bu durumun nedeni, aktif kalay konsantrasyonunu

tüketebilen iki veya daha fazla kalay atomunun bitişik katyon pozisyonlarını işgal etme olasılığının artmasıdır. En düşük dirence karşılık gelen en yüksek taşıyıcı konsantrasyonu, kalay katkılama seviyesi %10 olduğunda meydana gelmektedir (Elfallal vd. 1993). Kalayın indiyum oksit içindeki katı çözünürlüğü yaklaşık olarak %8'dir. Bu aralığın ötesinde kalay oksit oluşarak In_2O_3 'e ait kafes yapısını bozmaktadır. Böylece serbest taşıyıcı konsantrasyonu azalmaktadır (Elfallal vd. 1993).

İletkenliğin $10^3 \text{ ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$ değerinden daha fazla olmasını sağlamak ve kalay oksit fazı oluşumunu engellemek için katkılama seviyesi tipik olarak %8-10 olarak seçilmektedir. Bu katkılama seviyesi ise dejeneratif ITO üretmektedir (Gupta vd. 1989). ITO'nun yük taşıyıcı konsantrasyonu $10^{20} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ civarında olduğu için metal benzeri elektriksel özelliklere sahip olmaktadır. Ağır katkılı indiyum oksit için oksijen boşluklarının iletkenliğe katkısı ihmal edilebilmektedir.

ITO'nun dielektrik fonksiyonunun teorik yorumlaması Bender tarafından ele alınmıştır (Bender vd. 1999). Dielektrik sabitinin sanal kısmından, filmlerin soğurma (*absorption*) katsayıları üretilmiştir. 1 eV ve 4 eV değerlerinde keskin değişimler bulunmaktadır. 1 eV altındaki foton enerjileri (uzak kızılötesi bant) serbest elektronlar sebebiyle soğurulmaktadır. 4 eV üzerindeki foton enerjileri ise değerlik elektronunun uyarılmasına sebep olarak soğurulmaktadır. 1 – 4 eV aralığı ise ITO'nun geçirgenliğinin yüksek olduğu görünür ve yakın kızılötesi bölgeye karşılık gelmektedir (Bender vd. 1999).

Özet olarak boşluklu yapı ITO'nun optik performansını belirlemektedir. İletkenlik kısmı ise iletim bandına bağışlanan elektronlardan kaynaklanmaktadır. Taşıyıcı yoğunluğu artırıldığında iletkenlik metallerin düzeyine yaklaşmaktadır. Fakat serbest taşıyıcı yoğunluğunun artması, özellikle kızılötesi bantta optik soğurmaya yol açmaktadır. Bu sebeple iletkenlik ve optik geçirgenlik birbiri ile ters ilişkili olmaktadır. İnce katmanlı haldeyken transparan ve renksiz bir yapıda olsa da yığın halindeyken sarı – gri arası bir renk almaktadır.

İlk olarak 1947 yılında patentlenen ITO ekranlar, dokunmatik paneller, güneş panelleri vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Fakat malzeme özellikleri ve maliyeti nedeniyle

önemli dezavantajları bulunmaktadır. ITO seramik bir malzeme olduğu için %2-3 gibi nispeten düşük gerilmelerde dahi mikro çatlaklar oluşabilmektedir (Cairns vd. 2000). Bu mikro çatlaklar yayılarak filmin elektriksel iletkenliğinde dramatik düşüşlere yol açabilmektedir. Ayrıca tuz, asit ya da yapıştırıcı tabakaları ITO tabakasının aşınmasına sebep olabilmektedir (Sierros vd. 2009). Yüzey gerilmelerine bağlı sorunlar daha seyrek gözlenirse de esnek malzemeler üzerinde kullanımı ve ömrü üzerinde sınırlamalar olmaktadır. Ayrıca üretim, taşıma, cihaz montajı sırasında filmin çatlaması, cihaz tüketiciye ulaşmadan verim kayıplarına sebep olmaktadır. ITO filmlerle ilgili diğer bir sorun ise düşük indisli alttaşlarla birleştiğinde oluşan yüksek kırılma indisidir ($n \sim 2.0$). Bu sorunu engellemek için yansıma önleyici kaplamalar geliştirilmiş olsa da bu kaplamalar pahalı olabilmektedir.

ITO kaplamaların en büyük dezavantajlarından bir tanesi yüksek malzeme maliyeti olmaktadır. %90 indiyum oksit (In_2O_3) ve %10 kalay oksit (SnO_2) optimal elektro-optik özelliklere sahip bir karışım oluşturmaktadır (Hecht vd. 2011). Bu sebeple tipik bir ITO film kütlesinin %75'i indiyumdan gelmektedir ve küresel indiyum tüketiminin %75'ini ITO kaplamalar oluşturmaktadır (Tolcin 2010). Genellikle çinko madenciliğinin bir yan ürünü olan nadir bir metal olan indiyumun arzı ise Çin ve Kanada tarafından sınırlı olarak sağlanabilmektedir (Alfantazi ve Moskalyk 2003).

Ayrıca püskürtme prosesinde (*sputtering process*) indiyumun %3-30'u filme ulaşmakta ve kaynaklar oldukça verimsiz kullanılmaktadır (Tolcin 2010). Kalan ITO ise kabin duvarlarına yapışmaktadır. Bu sebeple geri dönüşüm ITO için önemli bir konu haline gelmiştir. Geri dönüşümde LCD panelleri küçük parçacıklara ayırarak içindeki indiyumu ayrıştırmak için asit çözeltisine daldırmak gibi yöntemler kullanılmaktadır (Tolcin 2010). Kaynakların sınırlı olmasına rağmen LCD (liquid crystal display) panellerin ve güneş panellerinin yaygınlaşması ITO talebini artırmıştır. Gelecekte proses ve cihaz maliyetlerinin de düşmesi ile ITO maliyeti daha da ön plana çıkacaktır. Bu sebeple ITO'ya alternatif iletken metal oksit arayışları devam etmektedir.

ITO kaplamalara ait başka bir sorun ise esneme veya gerilme sonrası oluşan mikro çatlaklardır. Bu çatlaklar gözle görülme de ilerleyen zamanlarda iletkenlik üzerinde

dramatik düşüşler oluşturabilmektedir. İndiyum ve kalay oranlarının değiştirilmesi mekanik özelliklerde bir miktar iyileşme sağlasa da elektro-optik performansa zarar vermektedir (Hecht vd. 2011).

ITO'ya alternatif düşük maliyetli alternatif arayış çalışmaları ise devam etmektedir. Örnek olarak azaltılmış indiyum içeren $\text{ZnO-In}_2\text{O}_3$, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ ve indiyum içermeyen alüminyum ve galyum katkılanmış çinko oksit (ZnO) gösterilebilmektedir. Fakat gerek elektriksel kararlılık gerekse çevresel etkilere dayanım konusunda ek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

ITO performansını gözlemlemek amacıyla Aselsan MGEO yerleşkesinde B270 cam alttaşı üzerine ITO kaplama uygulanmıştır.

Şekil 2.2'de çıplak ve ITO kaplanmış örnekler gösterilmektedir. 360 nm kalınlığındaki kaplamanın optik ve elektromanyetik iletim kaybı ölçülmüştür.

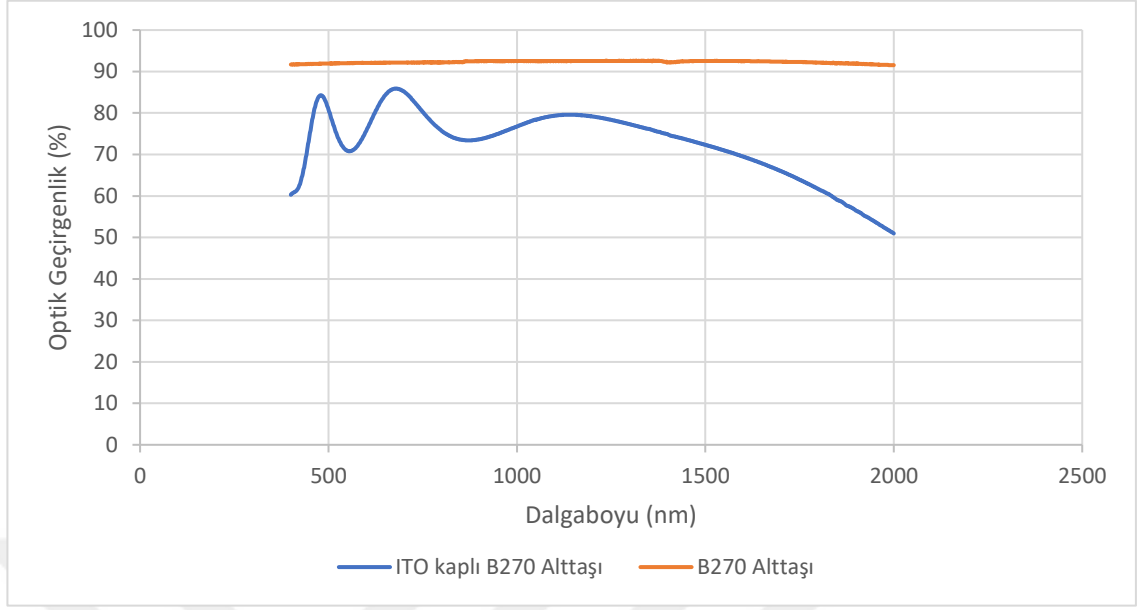


Şekil 2.2 ITO Kaplanmış (Sol) ve Çıplak B270 (Sağ) Cam Alttaşı Görünümü



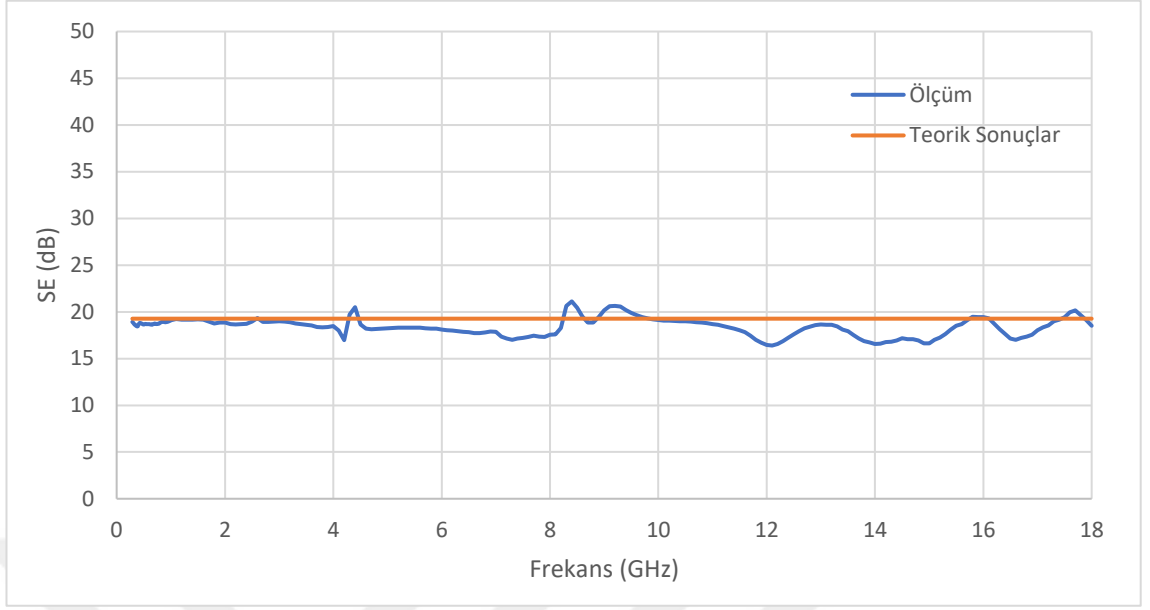
Şekil 2.3 PerkinElmer Lambda 950 UV/VIS Spektrometre Düzenegi

Optik geçirgenlik ölçümleri PerkinElmer Lambda 950 UV/VIS spektrometre cihazı ile ölçülmüştür. Görünür bantta kaplamanın maksimum geçirgenliği %93, ortalama olarak %84 olarak ölçülmüştür. 650 nm dalga boyunda bir dip yaptıktan sonra geçirgenlik 700 nm'de %86 seviyesine çıkmaktadır. Sonrasında ise tekrar yavaş yavaş azalmaktadır. 2000 nm sonrasında ise optik geçirgenlik hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu karakteristik ile ITO kaplamalar görünür bant ve yakın kısa dalga kızılötesi bandında (*near Short Wave Infra Red*) kullanılabilir. Daha büyük dalga boylarında ise ITO'nun geçirgenliğinden bahsedilememektedir.



Şekil 2.4 ITO Kaplama Optik Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları

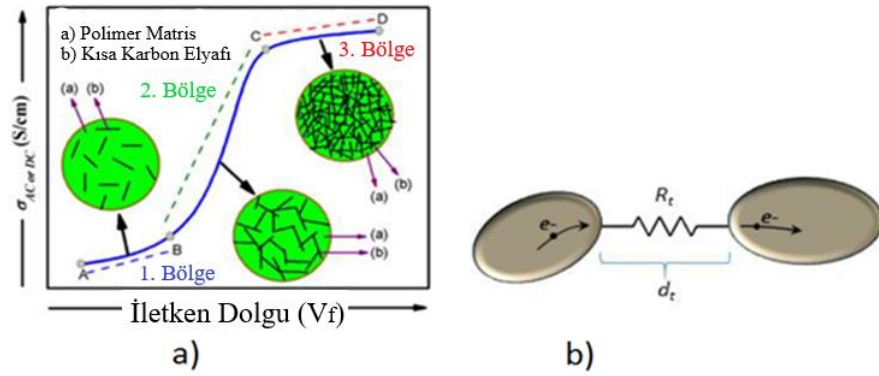
Kaplamanın yüzey direnci ise 4 nokta prob (*4-point probe*) yöntemiyle $23 \Omega/\square$ olarak ölçülmüştür. Kaplamanın düzgünlüğünün kontrolü için birkaç farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Kaplamalar için kullanılan genel ekranlama etkinliği formülüne göre teorik değer 19.27 dB olarak hesaplanmıştır. Ekranlama etkinliği ise Koaksiyel tutucu yöntemiyle 300 MHz – 18 GHz frekans bandında gerçekleştirilmiştir (Bu yöntemin detayları ASTM-D4935 standardı ve (Sarto ve Tamburrano 2006)’de verilmiştir). Düzenekte Vektör Ağ Analizörü (*Vector Network Analyzer - VNA*) kullanılmıştır. Arka arkaya 10 ölçüm alınmış ve Monte Carlo yöntemiyle belirsizlik azaltılmaya çalışılmıştır. Yukarıda bahsedilen ITO kaplama, ortalama 18.7 dB ve minimum 16.4 dB ekranlama sağlamıştır. Teorik sonuçlar ve ölçüm sonuçları 2.9 dB sapma ile birbirine yakın gözükmektedir.



Şekil 2.5 ITO kaplama ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları

3. GRAFEN

Grafen nano kompozitlerin geliştirmeye açık özelliklerinden birisi elektriksel iletkenliktir. Bu nano kompozitlerin iletkenliği, geleneksel iletken malzemelere göre farklı avantajlar getiren elektriksel sızıntıya (*percolation*) dayanmaktadır. Bu sızıntı özelliği sayesinde malzemelerin harici bir yük altında deformasyonunun tespiti ya da kûrlenme sürecinin analizi mümkün olmaktadır (Luo ve Liu 2014). İletken bir nano dolgu maddesi bir yalıtkan malzeme ile karıştırıldığında, ortaya çıkan nano kompozitin toplam elektriksel iletkenliği, eklenen nano dolgu miktarına bağlı olarak değişebilmektedir. Nano dolgu fraksiyonuna dayalı olarak 3 farklı durum tanımlanabilmektedir. İlk durum nano dolgu konsantrasyonunun oldukça küçük olduğu ve her bir nano parçacığın birbirinden izole olduğu durumdur. İlk durumda nano kompozit elektriksel olarak iletken olmamaktadır. İkinci durum ise kritik bir hacim fraksiyonunun, elektronların bir nano parçacıktan diğerine ‘zıplayabilecek’ kadar yakın konumlanmasıdır. Bu durumda nano kompozit boyunca sızıntı patikaları oluşmakta ve elektriksel iletkenlikte dramatik



şekil 3.1 a) Polimer/İletken Dolgu Kompozitlerinde Sızma Davranışının şematik Olarak Gösterimi (Ram vd. 2017) b) İletken Nano Kompozitlerin Elektriksel Davranışında Baskın Mekanizma Olan, Birbirinden d_t Mesafeye Yerleştirilmiş İki Grafen Levha Arasındaki Elektron Tûnelleme Gösterimi (Santagiuliana 2019)

değişim meydana gelmektedir. Üçüncü durum ise yüksek nano dolgu fraksiyonu durumu için ayrılmaktadır. Burada nano kompozit iletkenliği (σ_c), nano dolgu maddesi iletkenliğine (σ_f), yaklaştıkça artış hızı azalmaktadır. Bu üç durum şekil 3.1’de gösterilmektedir.

Sızıntı eşiğine yakın veya eşik üzerindeki bu davranış, sızıntı teorisi tarafından açıklanmaktadır.

$$\sigma_c = \sigma_f \left(\frac{V_f - V_c}{1 - V_c} \right)^s \quad (3.1)$$

σ_c : nano kompozit iletkenliği

σ_f : nano dolgu maddesi iletkenliği

s : nano kompozit içindeki iletken ağ boyutuna göre değişen bir sayı

V_c : Sızma eşiği

V_f : Dolgu malzemesi hacim oranı

2 boyutlu ağlar için s parametresi değer 2'den küçük olurken 3 boyutlu ağlar için 2'den daha büyük olmaktadır. Sızma eşiği olan V_c kullanılan nano dolgu maddesinin tipine ve nano kompozit içindeki oryantasyonuna bağlı olmaktadır. İyi hazırlanmış (2 boyutlu ve rastgele yönlendirilmiş) grafen levhalar içeren nano kompozitler için sızıntı eşiği, teorik olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir (Li ve Kim 2007):

$$V_{c,2D} = 2\pi \frac{\xi^2 t^3}{(\xi t + d_t)^3} \quad (3.2)$$

t : Grafen nano levhanın ortalama kalınlığı

d_t : maksimum tünel mesafesi (polimerler için yaklaşık olarak 10nm)

ξ : grafenin hem en-boy oranı

$V_{c,2D}$: İki boyutlu sızma eşiği

Tünel mesafesi elektronların bir grafen levhasından diğerine atlayabilmesi için gereken maksimum mesafedir. Şekil 3.1b'de bu durum görsel olarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Bir nano kompozit, rastgele yönlendirilmiş 3 boyutlu levhalar içeriyorsa, malzemeyi yalıtıkandan iletkene dönüştürmek için gereken minimum grafen miktarı, 2 boyutlu durumuna göre 3 kat daha fazla olmaktadır (Li ve Kim 2007):

$$V_{c,3D} = \frac{27\pi}{4} \frac{\xi^2 t^3}{(\xi t + d_t)^3} \quad (3.3)$$

t : Grafen nano levhanın ortalama kalınlığı

d_t : maksimum tünel mesafesi (polimerler için yaklaşık olarak 10nm)

ζ : grafenin hem en-boy oranı

$V_{c, 3D}$: Üç boyutlu sızma eşiği

Yukarıda belirtilen denklemler incelendiğinde sızıntı eşiğinin, grafenin hem en-boy oranına (ζ) hem de kalınlığına bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, grafen nano kompozitler için bulunan sızıntı eşiği değerinin, karbon fiber ya da siyah karbon (carbon black) türlerinden daha düşük olmasının ana sebebidir. Geleneksel kullanımda karbon fiberler yüksek en-boy oranına sahip olmaktadır. Fakat kalınlıkları birkaç mikrometreyi geçmemektedir (Santagiuliana 2019).

Küçük sızıntı eşiği durumunda, polimeri iletken hale getirmek için daha az iletken dolgu malzemesi gerekmektedir. Grafen nano kompozitler için sızıntı eşiği, genellikle hacmin %2'sinden daha küçüktür. Ek olarak bu eşik değeri hem grafen kalitesine hem de nano kompozit hazırlamak için uygulanan tekniğe bağlıdır. Ulaşılan iletkenlik seviyesine bağlı olarak grafen nano kompozitler, elektrostatik yayılım $\sigma < 10^{-4} S/m$, elektrostatik boyama $10^{-4} < \sigma < 10 S/m$ ya da elektromanyetik ekranlama $\sigma > 10 S/m$ amacıyla kullanılabilir (Santagiuliana 2019). Bunlara ek olarak grafen nano kompozitlerin iletkenliği, gerginlik algılama uygulamaları için de faydalı olabilecektir. Grafen içeren polimerlere dayalı gerilim sensörlerinin avantajı, metalden yapılmış geleneksel gerilim ölçerlere göre çok daha yüksek seviyede hassasiyet sağlayabilmesidir. Her iki sensör türü de deforme eden bir dış kuvvetin oluşturduğu gerilmeye (ϵ) karşılık bir direnç değişimi (ΔR) oluşturmaktadır. Metal gerilim ölçerlerde elektriksel iletkenlik (σ) etkilenmediği için yalnızca boyutsal değişiklik gerilim değişimine sebep olmaktadır. Bu durumun aksine, grafen nano kompozitlerin iletkenlik değeri gerilme ile değişmektedir. Deformasyon esnasında grafen levhalar arasındaki mesafenin giderek daha fazla artması, bu durumu açıklamaktadır. Sonuçta ise tünel direncinin (R_t) değeri, toplam iletkenlik üzerinde daha etkili olmaya başlamaktadır. Genel olarak bir gerilme ölçerin (düşük gerilme altında) nispi direnç değişimi aşağıdaki gibi gösterilebilmektedir (Boland vd. 2014):

$$\frac{\Delta R}{R_0} = (1 + 2\nu)\varepsilon + \frac{\Delta\sigma(\varepsilon)}{\sigma_0} \quad (3.4)$$

R_0 : deformasyon olmadığı durumda malzemenin direnci

σ_0 : deformasyon olmadığı durumda malzemenin iletkenliği

ν : Poisson oranı

Denklemdaki ilk terim yalnızca boyutsal değişikliklerden kaynaklanan direnç değişimini açıklarken, ikinci terim gerilmeye göre değişen iletkenliği ifade etmektedir. İkinci terim metal gerilme ölçerlerde ihmal edilebilmektedir. Bir gerilme sensörünün hassasiyeti, bağıl direnç değişiminin gerilmeye nasıl bağlı olduğunu ifade eden gösterge faktörü (gauge factor) ile değerlendirilmektedir:

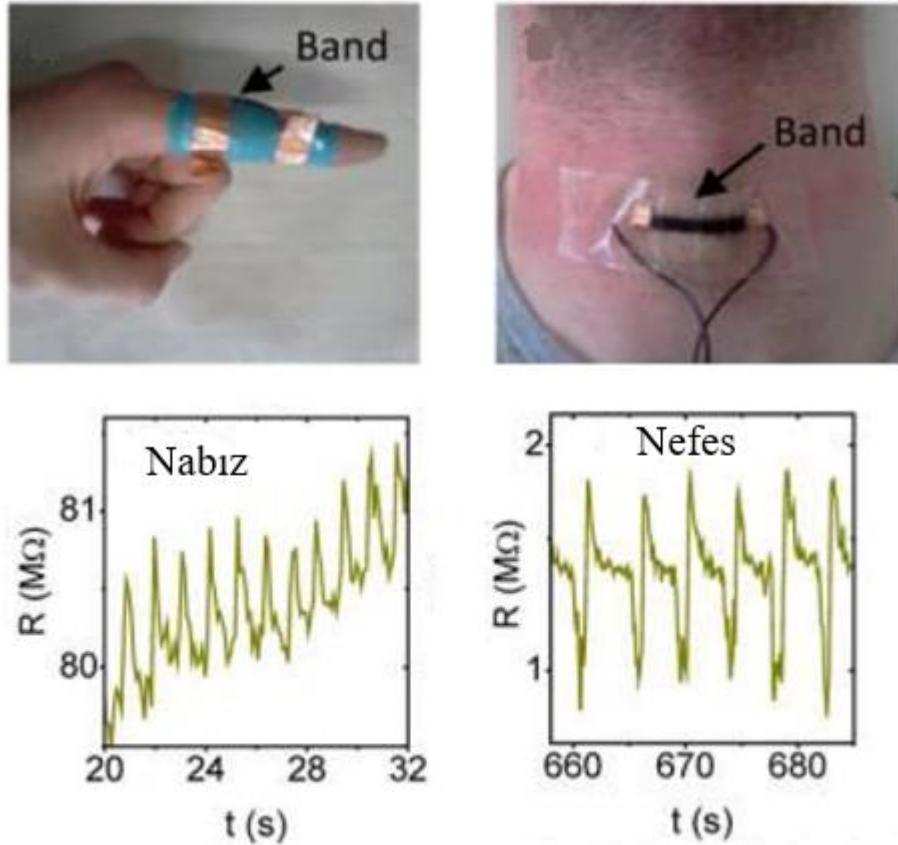
$$GF = \frac{d(\Delta R/R_0)}{d\varepsilon} = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{d\varepsilon} \quad (3.5)$$

Buna göre düşük gerilmedeki metal tabanlı gerilme sensörleri için Gösterge Faktörü yaklaşık 2'ye eşit olmaktadır. Fakat grafen nano kompozitler 50'ye kadar Gösterge Faktörüne sahip olabilmektedir (Boland vd. 2014). Bu sayede gerilmeyi tespit etmede geleneksel ölçü aletlerine göre çok daha etkili olmaktadır. Potansiyel olarak, grafen sızıntı eşiği civarında daha yüksek Gösterge Faktörüne sahip olabilmektedir. Olası bir deformasyon etkisi, parçacıklar arası mesafeyi artırdığından Grafen konsantrasyonunu azaltmak ile aynı etkiyi yaratmaktadır. Bu sebeple sızıntı bölgesinde iletkenliğin birkaç 10 kat değişmesi gibi Gösterge Faktörü de 1000 kat ya da daha fazla değişme potansiyeli taşımaktadır (Santagiuliana 2019).

Grafenin incelenen özellikleri hem yapısal bileşenler oluşturmak için hem de bütün bir yapıyı incelemek ve deformasyonları algılamak için kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Yapısal malzemelerin yanı sıra grafen nano kompozitler kullanılarak insanların vücut hareketleri de incelenebilmektedir. Grafen nano kompozitlere dayalı giyilebilir sensörler gerilme özellikleri sayesinde kalp atışı, kan basıncı vb. hayati fonksiyonları izleyebilmektedir. Geleneksel silikon/metal bazlı elektronikler ise vücut hareketlerine göre deforme olabilen, esnemeye ve katlanmaya karşı dayanıksız bir yapıda olduklarından dezavantajlı durumda olmaktadır. Bu sebeple cilde monte edilme ya da

kıyafet entegrasyonu amaçlarıyla kullanılamamaktadır. Grafen nano kompozitler bu anlamda önemli bir potansiyel barındırmaktadır.

Bu açıdan bakıldığında literatürde hazırlaması kolay ve oldukça hassas grafen tabanlı gerilme sensörleri raporlanmıştır. Şekil 3.2’de 35 Gösterge Faktörüne sahip bir gerilme sensörü gösterilmektedir (Boland vd. 2014). Bu sensörün %800’den daha büyük gerilmeleri ve solunum, nabız gibi düşük genlikli gerilmeleri tespit edebildiği belirtilmektedir.



Şekil 3.2 Grafen Nano Kompozit Sensör Uygulamaları

Bir diğer çalışmada ise silikon bazlı bir kauçuğa grafen aşıl原因arak solunumu, nabızı ve yürüyen bir örümceğin hareketini algılayabilen Gösterge Faktörünün 500’den daha büyük olduğu bir sensör tasarımı raporlanmaktadır (Boland vd. 2016).

Ayrıca grafenin kaplama olarak kullanılmasıyla cam elyafı (fiber-glass) deformasyonunu tespit edebileceği belirtilmektedir. Buna ek olarak Grafen eklenmesiyle malzeme tamamen elektriksel hale gelmediğinden metal teması ile oluşan galvanik korozyon da engellenmiş olmaktadır (Luo ve Liu 2014).

Grafen uygulamaları basit üretim tekniklerinin ortaya çıkması ile son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Büyük parçalar üretmekte, bir yüzeyden diğerine aktarımda ve düşük yüzey direncine ulaşmakta hala iyileştirmeye ihtiyaç duyulsa da gelecek vaat eden performansı nedeniyle araştırılmaya değer bulunmaktadır. Mevcut araştırmalar grafen filme ait yüzey direncinin $11 \Omega/\square$ değerine kadar düşebileceğini ve %91 optik geçirgenlik performansına sahip olacağını belirtmektedir (Han vd. 2017). Grafene ait yüzey direnci ve ekranlama etkinliği değerleri ise $635 \Omega/\square$ ve 2.27 dB olarak raporlanmaktadır (Hong vd. 2012). Ekranlama etkinliği değerinin 2.2 – 7.5 GHz frekans bandında ölçüldüğü belirtilmektedir. Mümkün olan en yüksek performans ya da mevcut üretim sorunları değerlendirildiğinde grafenin ekranlama etkinliği uygulamaları için tek malzeme olarak kullanılması beklenmemektedir. Bununla birlikte ekranlama etkinliğinin büyük bir kısmı soğurma kaynaklı olduğundan geri yansımanın kritik olduğu Radar Kesit Alanı (RKA) uygulamalarında kullanılabileceği düşünülmektedir (Han vd. 2017).

4. METAL NANO KAPLAMALAR

Metaller bulundurdıkları serbest elektronları sebebiyle yeryüzündeki en iyi iletkenler olarak bilinmektedirler. Aynı zamanda yüksek yansıtıcılığa sahiptirler ve transparan değildirler. Metalleri optik olarak transparan haline getirmenin yöntemlerinden bir tanesi yeterince ince hale getirmektir. Metal filmler, genellikle 10 nm'den az kalınlıkta olduklarında görünür ışığa karşı şeffaf hale gelmektedir (Ghosh vd. 2009). Filmleri süreksiz hale getirecek ya da elektriksel iletkenliği zayıf olmayacak kadar kalın, yeterli ışığı iletecek kadar ince yapmak arasında hassas bir denge bulunmaktadır. Fuchs-Sondheimer ve Mayadas-Shatzkes teorileri, elektronların dış yüzeydeki ve kristal sınırlarındaki saçılmalar nedeniyle ince metalik filmlerin iletkenliğinin düştüğünü belirtmektedir. Bir metal film ortalama serbest yol uzunluğundan (mean free path length) daha ince olduğunda, direnç çarpıcı bir biçimde artmaktadır (Sondheimer 1952). Direnç malzeme kalınlığı ve genişliği ile ters orantılı olmakta ve nano elektronik uygulamalarında önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Her iki modelin ortak noktası ek direnç katkısının kitle özdirencine, elektron fonon saçılmasından kaynaklanan ortalama serbest yola ve ilgili uzunluk ölçeğine bağlı olduğudur. Bu nedenle ultra ince metal tellerin direnci, tel boyutunun ortalama serbest yol uzunluğunun kaç katı olduğuna göre değişmektedir. Kitle direnci (ρ_0) ve ortalama serbest yol uzunluğu (λ) çarpımı en düşük olan metal, ince yapılar için en uygun seçim olmaktadır (Gall 2016). Çizelge 4.1'de bazı iyi iletkenler ve onların nano elektronik uygulamalarında kullanılabilecek elektriksel özellikleri gösterilmektedir. Buna göre gümüş tablodaki en iyi iletken olmasına rağmen, özdirenci 5 kat daha yüksek olan indium ultra ince yapılarda öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.1 Bazı İyi İletkenler ve Özellikleri (Günay vd. 2021)

Element	<i>Kristal Yapısı</i>	ρ_0 ($\mu\Omega$ cm)	λ (nm)	$\lambda\rho_0$ ($10^{-16} \Omega\text{m}^2$)
Gümüş	fcc	1.587	53.3	8.46
Bakır	fcc	1.678	39.9	6.04
Altın	fcc	2.214	37.7	8.35
Alüminyum	fcc	2.650	18.9	5.01
İndiyum	bct	8.8	8.65/8.16	7.62/7.18

fcc: yüz merkezli dörtgen (*face centered tetragonal*)

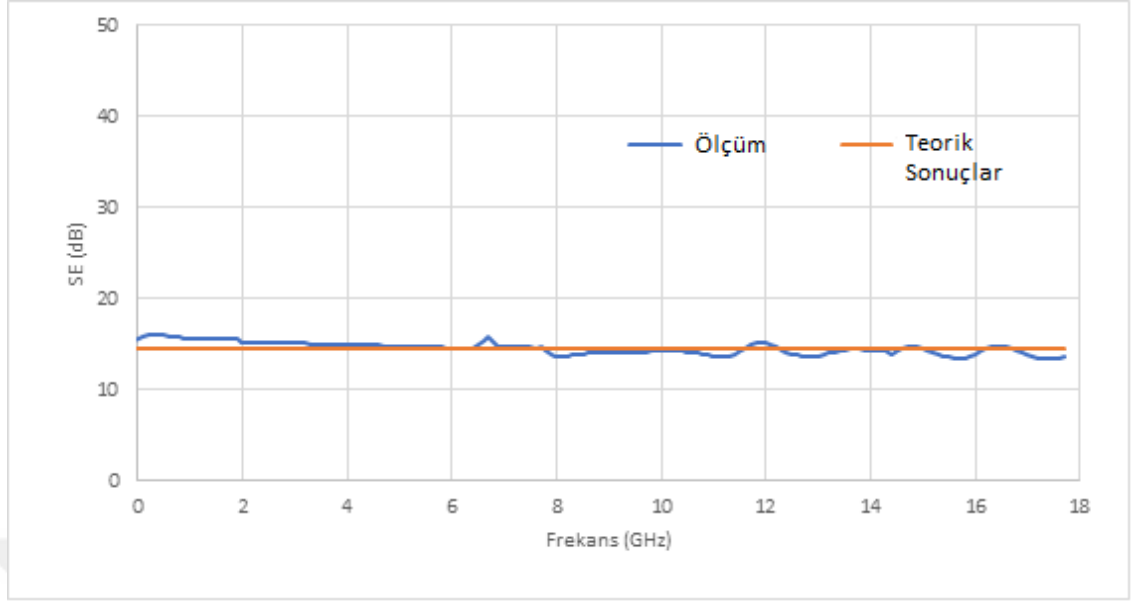
bct: gövde merkezli dörtgen (*body centered tetragonal*)

Altaş yüzeyinin pürüzlülüğü elektron taşıyıcılar için yüzey saçılımına yol açmakta ve iletkenliği azaltmaktadır (Ke vd. 2009). Temel bir kural, film sürekliliğini korumak için biriktirilen filmin yüzey pürüzlülüğünün film kalınlığından daha az olması gerektiğidir. Ayrıca film kaplamanın, ultra ince filmlerdeki ana kusur kaynakları olan safsızlıkları ve kirlenici maddeleri en aza indirecek şekilde yapılması gerekmektedir. İnce metal filmler, argon içinde DC püskürtme ile ultra yüksek vakumdan biriktirilebilmektedir. Krom ve nikel gibi metaller nispeten ucuz (ITO ile karşılaştırıldığında) ve çoğu organik ve yarı iletken malzeme ile uyumlu bir şekilde uygulanabilmektedir. Çeşitli pürüzsüz yüzeylerde biriktirilebilmektedir. Gümüş ise oldukça hızlı korozyona uğrayan bir metaldir. Korozyon direnci sağlamak için kütlece %1-5 paladyum gümüş filmlerle alaşım oluşturularak kullanılabilmektedir (Werlé vd. 2006).



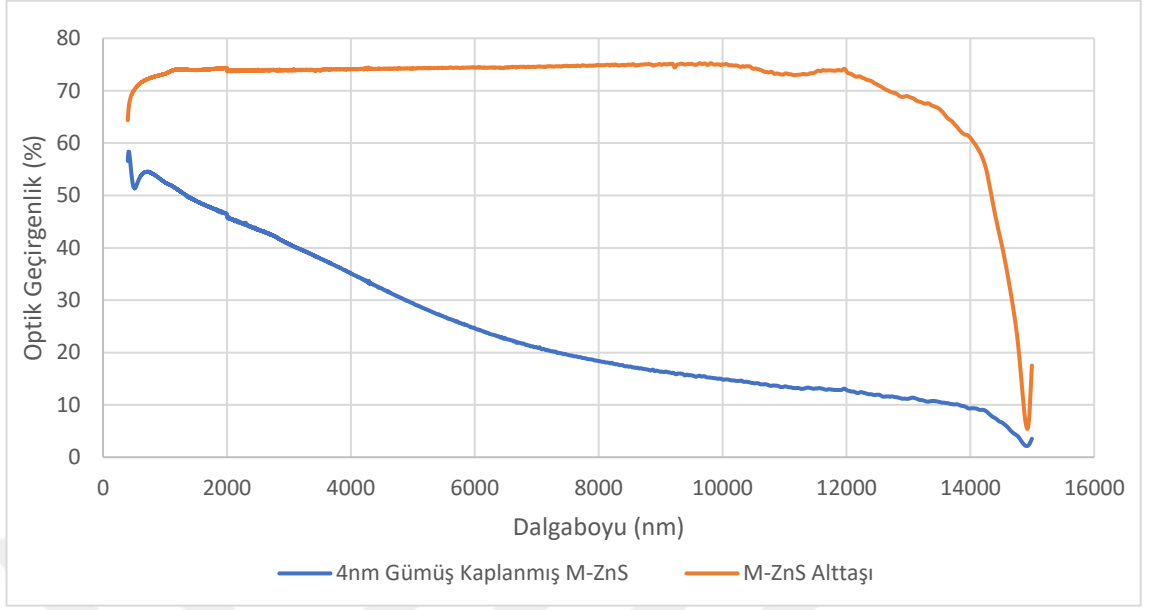
Şekil 4.1 4 nm Gümüş Kaplanmış ve Kaplanmamış M-ZnS Örneği

Ultra ince metalik filmler, bazı uygulamalar için yeterli optik geçirgenlik sağlayabilmektedir. Kızılötesi bantta daha yüksek yansımaya neden olmasına rağmen, Multispektral ZnS (Çinko Sülfür) alttaş üzerine Şekil 4.1'de gösterildiği gibi 4 nm gümüş kaplama uygulanmıştır. Gümüş kolay oksitlenen bir malzeme olduğundan, kaplama işleminden hemen sonra ölçümler yapılmıştır. Kaplamanın DC direnci 44Ω olarak ölçülmüştür. Bu koşullar altında beklenen ekranlama etkinliği 14.5 dB olarak hesaplanmaktadır. Şekil 4.2'de verilen ölçüm sonuçları, ultra ince gümüş kaplamanın yaklaşık 14 dB ekranlama sağladığını göstermektedir. 8.5 GHz komşuluğu dışında beklenen ve ölçülen değerler ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.2 4 nm Gümüş Kaplamaya ait Ekranlama Etkinliği Grafiği

Nano kalınlıktaki gümüş kaplamanın optik iletimi Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Görünür bantta ortalama %75 optik geçirgenlik elde edilse de kızılötesi bantta geçirgenlik hızla düşmektedir. Özellikle 7 μm 'den sonra optik geçirgenlik %20 ve altına düşmektedir ki bu kabul edilebilir bir değer değildir. İnce metal kaplamaların görünür bant ve komşuluğunda performansı ITO kaplamalardan bir miktar daha kötü, grafenden de daha iyi çıkmaktadır. Fakat kızılötesi bantta kullanımı için optik geçirgenlik performansı yeterli olmamaktadır.



Şekil 4.3 4 nm Gümüş Kaplamaya ait Optik Geçirgenlik Grafiği

5. METALİK AĞ YAPILARI

Metalik yapıların ikinci bir versiyonu ise metal filmlerin ağ yapısı oluşturacak şekilde boşluklu bir yapıya dönüştürülmesidir. Burada ağ yapısında oluşan boşluklar optik spektrumda %100 geçirgenliği sağlarken, metal hatlar ise RF enerjiyi engellemektedir. Literatürde metalik ağ yapıları periyodik yüzey konusunun bir alt başlığı olarak karşımıza çıkmaktadır. Tanım olarak periyodik yüzeyler bir ya da iki boyutta özdeş elemanların dizisiyle oluşturulan yapılardır. Bir RF üretecine bağlanmaları durumunda aktif dizi, toprak düzleminin devamı olarak kullanıldıklarında pasif dizi olarak adlandırılmaktadırlar. Aktif diziler anten uygulamalarında tercih edilirken pasif diziler Radar Kesit Alanını (RKA) düşürmek ya da girişim sinyallerini azaltmak için kullanılmaktadır. Bu yapılar açıklık (aperture) ya da yama (patch) tipinde olabilmektedir. Yüzey üzerinde indüktans ya da kapasitans oluşturularak istenilen alçak geçirgen, yüksek geçirgen ya da bant geçirgen filtreleme sağlanabilmektedir. Kapaticılık seviyesi düşük olduğu için optik geçirgenliğin kritik olduğu uygulamalarda açıklık yapıları tercih edilmektedir. Metalik ağ yapıları 1960'lı yıllarda özellikle askeri uygulamalarda dikkat çekmeye başlasa da bilinen en eski patent 1919 yılında Marconi ve Franklin tarafından alınmıştır (Marconi ve Franklin 1914). Burada bahsedilen ve tellerden oluşturulan yansıtıcı, periyodik yüzeylerden ilk olarak bahsedilen patent ve belge olma özelliği taşımaktadır. İleriki yıllarda özellikle düşük RADAR görünürlüğünün önem kazanmasıyla metalik ağ yapıları ile ilgili araştırmalar da artmıştır. Yapıların performansını etkileyen temel bileşenler şu şekilde sıralanabilir:

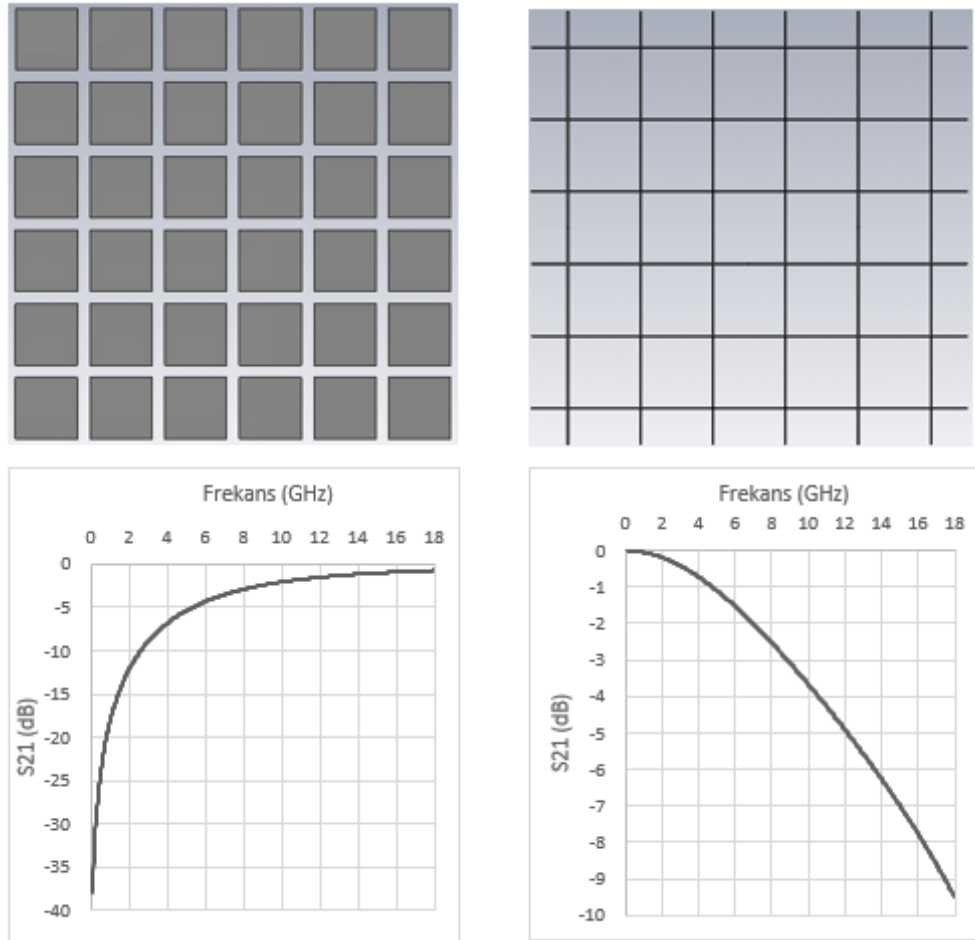
- Dizi elemanlarının tipi (hat veya yama)
- Dizi elemanlarının şekli, boyutu ve elemanlar arası boşluklar
- Alttaşın elektriksel özellikleri
- Kırınım sırası oluşumu
- MTF (Modülasyon Transfer Fonksiyonu) değişimi

Periyodik yüzey tasarımı için yukarıda belirtilen parametrelerin dikkatlice analiz edilmesi ve optimizasyonu önem arz etmektedir. Özellikle optik sistemlerde bakış hattı üzerine

eklenen yapılar görüntüye girebildiği için ya da menzıl performansını düşürebildiği için minimum kapaticılık da kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

5.1 Dizi Elemanlarının Tipi: Hat ve Yama Yapıları

Bir dielektrik yüzey üzerinde metalik hatlar ve açıklıklar oluşturularak filtreleme sağlanabilmektedir. Metalik yamalar, kapasitif bir davranış ve yüksek frekansları filtrelemeyi sağlarken, metalik hatlar ise indüktif özellik göstermekte düşük frekansları filtrelemeyi sağlamaktadır. Tasarımda kapasitif ve indüktif yapılar birlikte kullanılarak ihtiyaç duyulan frekans tepkisi oluşturulabilmektedir. Şekil 5.1’de bu yapıların iletim kaybı grafikleri gösterilmektedir. Bu yapıların farklı kombinasyonlarının birlikte kullanımıyla bant geçirgen ya da bant sönümleyen filtre tasarımı da yapılabilir.



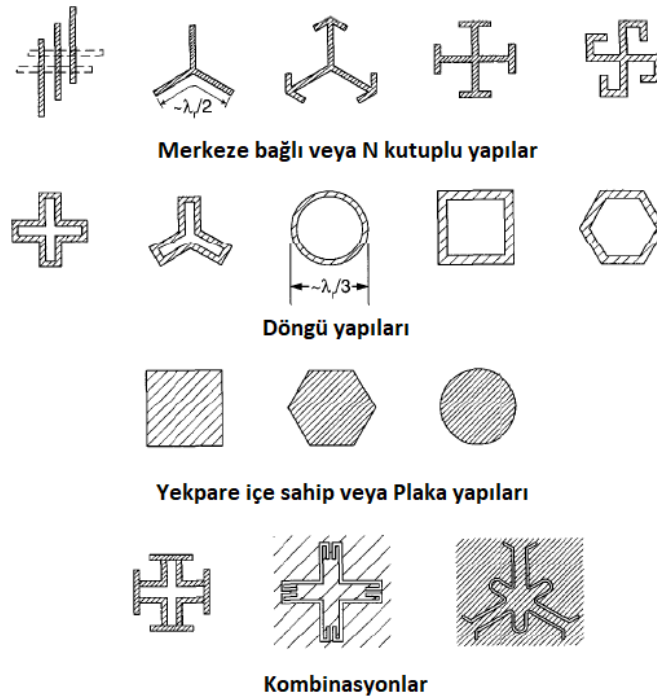
Şekil 5.1 Kapasitif ve İndüktif Yapıların Frekans Tepkisi

5.2 Dizi Elemanlarının Şekli, Boyutu ve Elemanlar Arası Boşluklar

Dizi elemanlarının şekli tasarımın kritik parametrelerinden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bazı şekiller yapısal olarak dar bantlı ya da geniş bantlı tepkiye sahip olabilmektedir. Genellikle dalga boyuna göre daha küçük yapılar ve daha düşük periyota sahip yapılar geniş bant tepkiye sahip olmaktadır. Frekans seçici yüzeylerin incelenmesinde ise Ben A. Munk'ın önerdiği 4 kategori tercih edilmiştir. Bunlar;

- 1- Merkeze bağlı veya N-kutuplu yapılar
- 2- Döngü yapıları
- 3- Yekpare içe sahip veya plaka türleri
- 4- Kombinasyonlar

Bu yapıların örnekleri ise aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



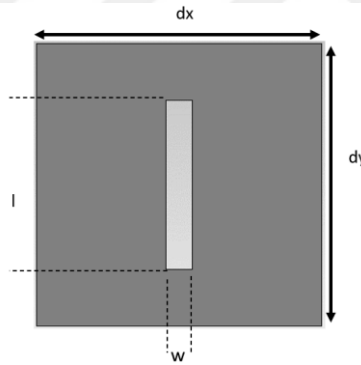
Şekil 5.2 Metalik Ağ Yapıları Kategorileri (Munk 1968)

Merkez bağlantılı (N kutuplu) yapılara iki kutuplu (*dipole*), üç kutuplu (üç bacaklı), çapa, Kudüs haçı örnek olarak gösterilebilmektedir. Tekil iki kutuplu yapılar ise aslında birçok

tasarımın temelini oluşturmaktadır. Bu sebeple iki kutuplu yapılar ve onun Babinet karşılığı bu çalışmada öne çıkarılmıştır.

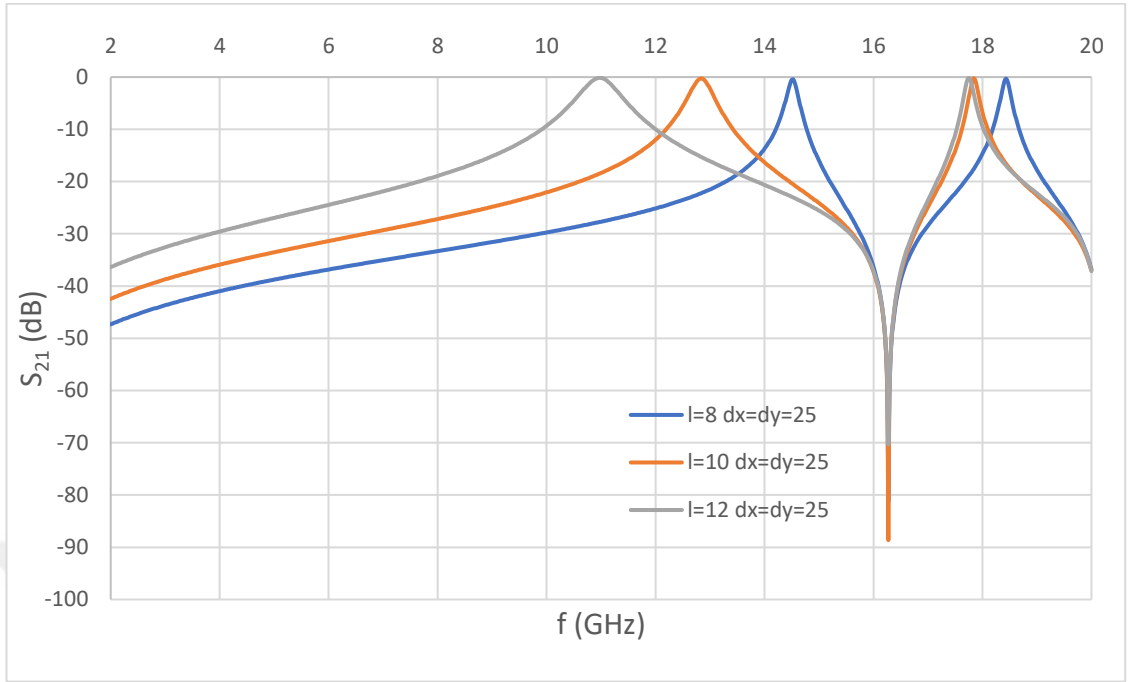
Çift kutuplu periyodik yüzeyler basit üretim teknikleri ile üretilebilmeleri ve kolay analiz edilebilmeleri sebebiyle en fazla tercih edilen yapılardan biridirler. Ayrıca daha karmaşık yapıların da temelini oluşturmaktadırlar. Örneğin bir kare döngü yapısı, 4 adet çift kutuplunun birleşiminden oluşmaktadır. Fakat polarizasyon bağımlı olmaları ve hassas hizalama gerektirmeleri kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Çift kutuplu antende olduğu gibi açıklık (*slot*) tipi periyodik yüzey de dalga boyunun yarısına karşılık gelen frekansta rezonans üretmektedir. Babinet prensibine göre açıklık tipi periyodik yüzey de aynı rezonans frekansına sahip olmaktadır.

$$f_c = \frac{1}{2kl\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (5.1)$$

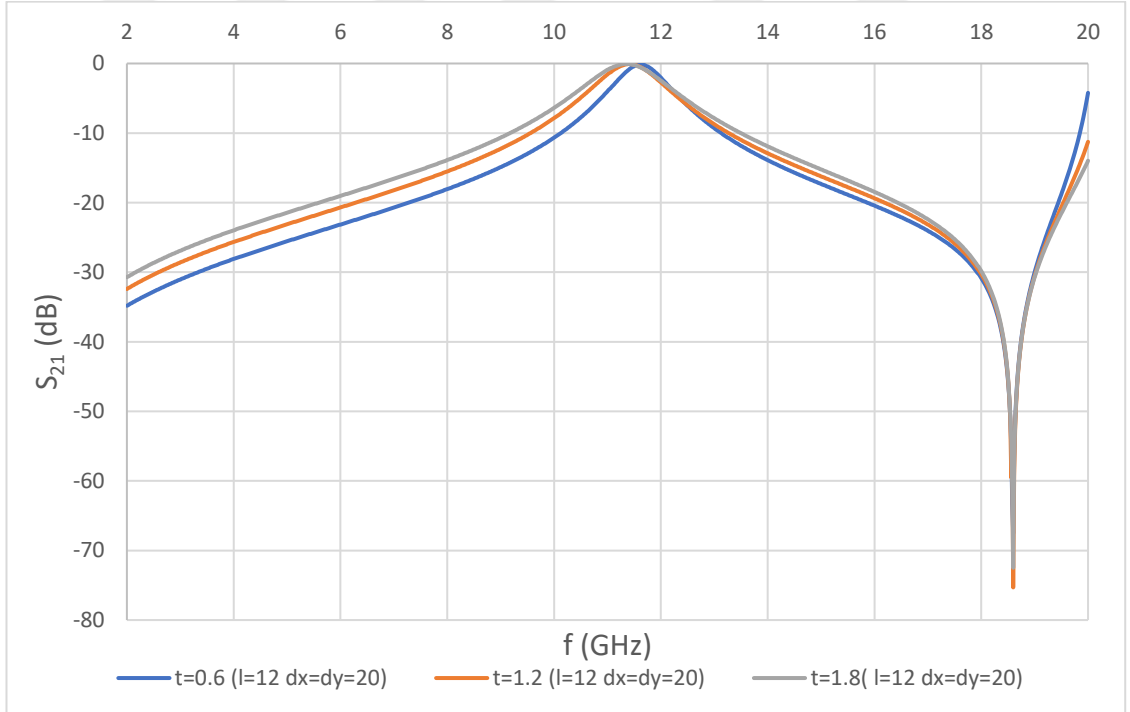


Şekil 5.3 Açıklık (Slot) Tipi Periyodik Yüzey Modeli

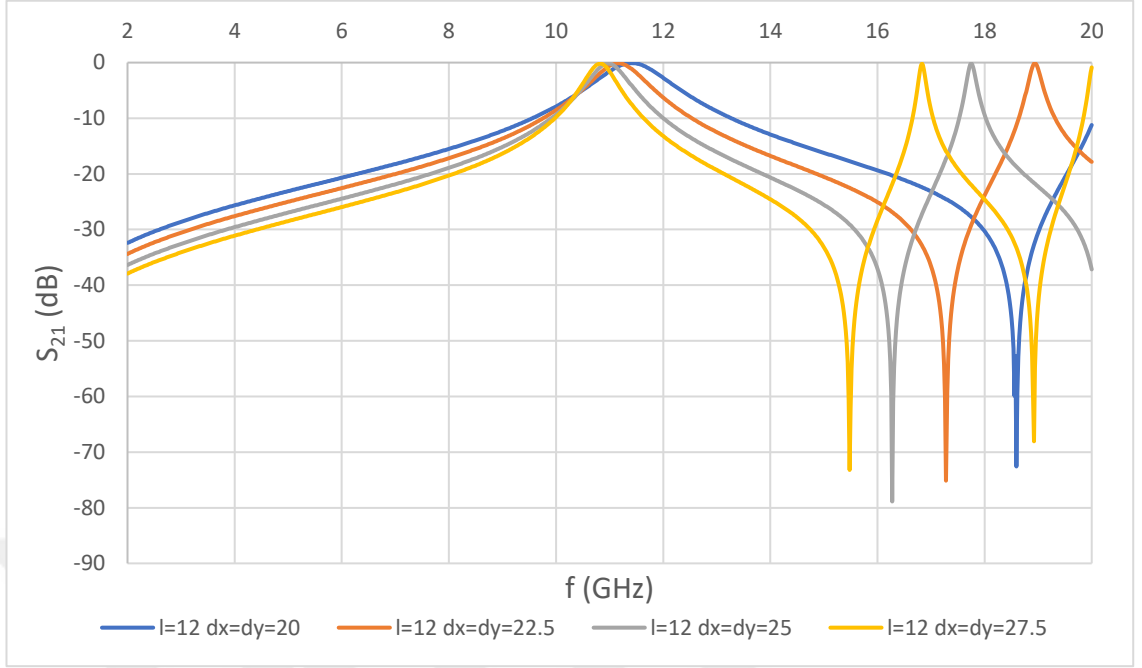
Tek katmanlı ve bağımsız (*free standing*) bir açıklık tipi periyodik yüzeyde, uzunluğunun değişimiyle rezonans frekansının değişimi Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Beklenildiği gibi uzunluk arttıkça rezonans frekansı düşmektedir. Ayrıca periyot sabitken çift kutuplunun genişliği artırıldığında iletim kaybı artmaktadır. Aynı tasarımın Babinet karşılığında açıklığın genişliği artırıldığında ise bant genişliği artmaktadır. Bu etkiler Şekil 5.5'te ve Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Anten teorisinden de bilindiği gibi çift kutuplunun bant genişliği genellikle kablo yarıçapı ile doğru orantılı olmaktadır.



Şekil 5.4 Hat Uzunluğuna Bağlı Olarak Rezonans Frekansı Değişimi



Şekil 5.5 Hat Genişliğine Bağlı Olarak Rezonans Frekansı Değişimi

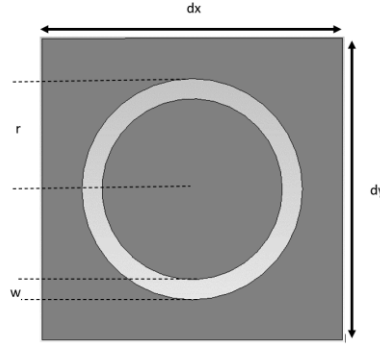


Şekil 5.6 Açıklık Genişliğine Bağlı Olarak Rezonans Frekansı Değişimi

Şekil 5.6’da dizi elemanları arası boşlukları dx ve dy olan döngü yapısı gösterilmektedir. Floquet teoreminin doğrudan bir sonucu olarak, indüklenen manyetik akımların fazları aşağıda gösterildiği gibi geliş açısı ile değişmektedir. Dalganın yayılım yönü ‘s’ vektörü ile ifade edilmektedir. Tüm elemanların genliği aynı olurken faz bilgisi gelen dalga ile aynı olmaktadır. Burada q sütun ve m satırında bulunan eleman için hesaplama yapılmaktadır (Floquet 1883). Ayrıca, elemanlar arası boşlukları arttıkça elemanlar arasındaki karşılıklı bağlantı azalmaktadır. Bununla birlikte, elemanlar arası geniş boşluklar, ızgara loblarının erken başlamasına yol açmaktadır. Izgara lobları, iki komşu eleman arasındaki faz gecikmesi 2π ’nin katına eşit olduğunda meydana gelen istenmeyen iletimler olarak tanımlanmaktadır (Munk 2000). Şekil 5.6’da $dx = dy = 27.5\text{mm}$ için iletim eğrisinin 17 GHz civarında bir ızgara lobuna sahip olduğu gözlenmektedir. Izgara loblarının erken başlamasını önlemek için, elemanlar arası boşluklar oldukça düşük seçilmelidir. Bu şekilde, Şekil 5.6’da açıkça görüldüğü gibi bant genişliği de arttırılabilmektedir. En düşük periyoda sahip $dx = dy = 20\text{ mm}$ için bant genişliğinin en yüksek olduğu gözlenebilmektedir.

$$I_{qm} = I_{0,0} e^{-j\beta_q D_x s_x} e^{-j\beta_m D_z s_z} \quad (5.2)$$

Döngü tipi elemanlar grubu, Şekil 5.2’de gösterildiği gibi dört ayaklı yüklü eleman, üç ayaklı yüklü eleman, daire, kare ve altıgen yamalardan oluşmaktadır. Bu elemanlar arasında özellikle üretim kolaylığı bakımından kare yamalar öne çıkmaktadır. Özellikle daire tipi yamaların üretiminde oldukça yüksek maliyet gerektiren teknikler kullanılmaktadır.

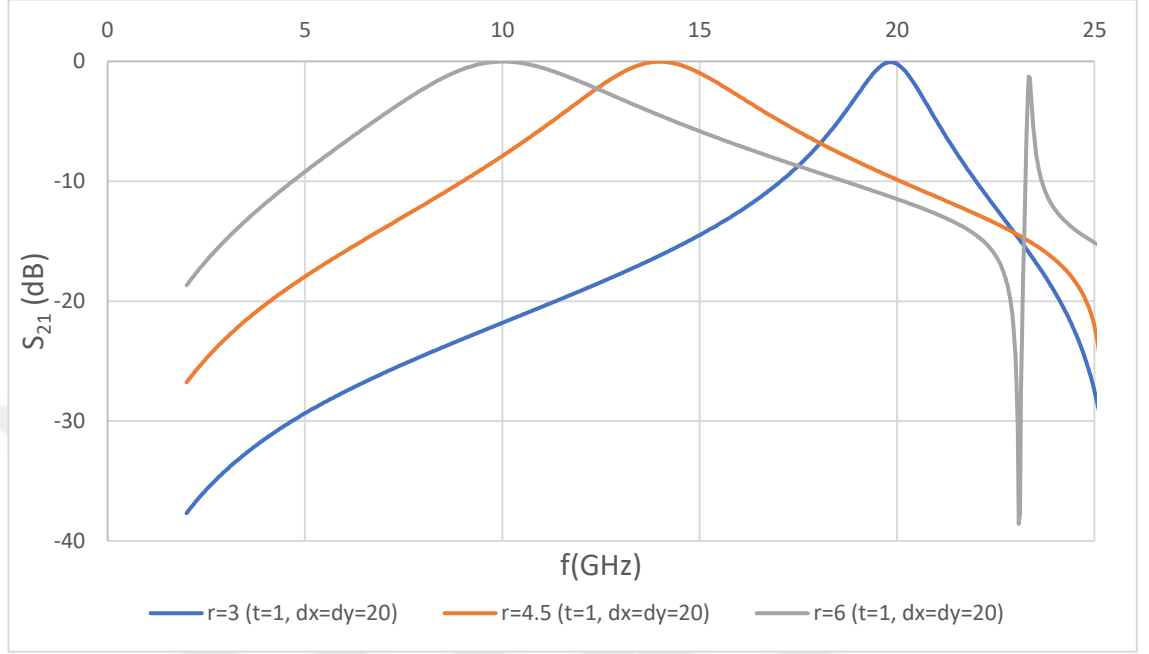


Şekil 5.7 Daire Tipi Döngü Yapısı Modeli

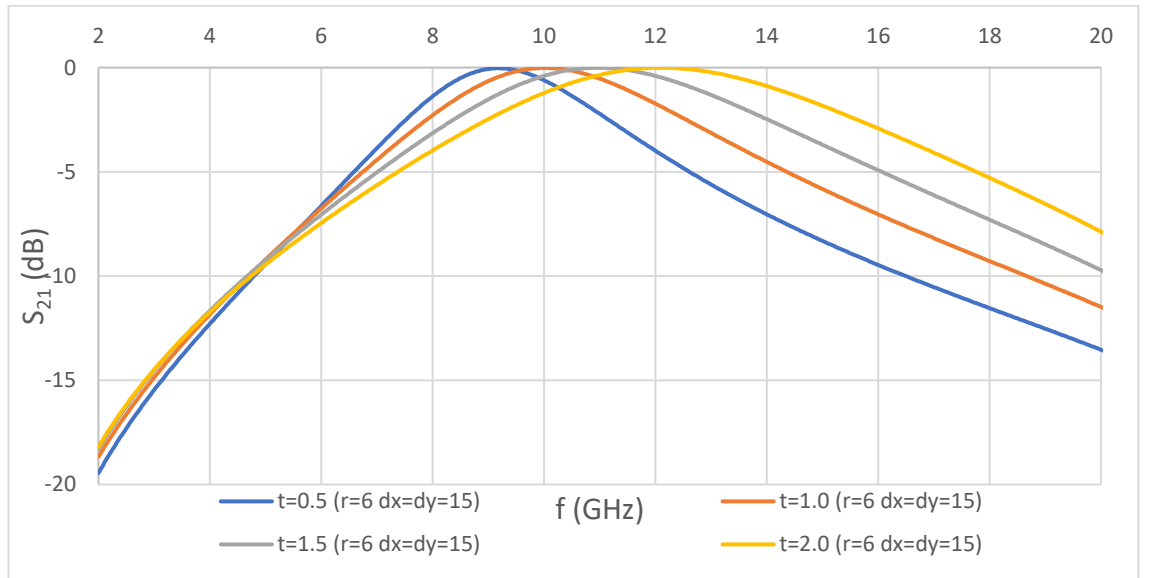
Şekil 5.7’de tipik bir daire tipi döngü yapısı gösterilmektedir. Döngü yapıları polarizasyon bağımsız olduğu için yatay, dikey ya da dairesel polarizasyona ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılabilir. Bu yapıları anlamak için daire tipi açıklığa, daire tipi yama eklenmiş gibi düşünülebilir. Bu durumda rezonans frekansı açıklığın çevresi ile ilişkili olacaktır. Diğer bir ifade ile döngü yapısının çevresinin dalga boyuna eşit olduğu frekans, rezonans frekansı olacaktır. Şekil 5.8’de açıklığın yarıçapına göre değişim karakteristiği gösterilmiştir. Bant genişliği ise açıklığın, yamanın şekline ve aradaki mesafeye göre değişmektedir (Munk 2000). Yarıçapı ve boşluk genişliğini değiştirerek rezonans frekansının ayarlanabildiği Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 üzerinden yorumlanabilmektedir.

Açıklık tipi periyodik yüzeylerde olduğu gibi döngü tipi yapılarda da uzunluğun (yarıçapın) artması, rezonans frekansının azalmasına sebep olmaktadır. Fakat kertik genişliğinin (w) değişimi iki yapıda tamamen farklı sonuçlar oluşturmaktadır. Şekil 5.9’da kertik genişliği arttıkça rezonans frekansının arttığı sonucuna varılmaktadır. Bu durum, eşdeğer devre karşılığı LC olarak düşünüldüğünde anlaşılmaktadır. Döngüde bulunan kertik yapısı iki metal havuzu ve dolayısıyla bir kapasitör yapısı oluşturmaktadır. Döngünün genişliği azaldığında, bu iletkenler birbirine yaklaşmakta ve eşdeğer

kapasitans artmaktadır. Bu nedenle, rezonans frekansı artan kapasitans ile aşağı doğru hareket etmektedir.

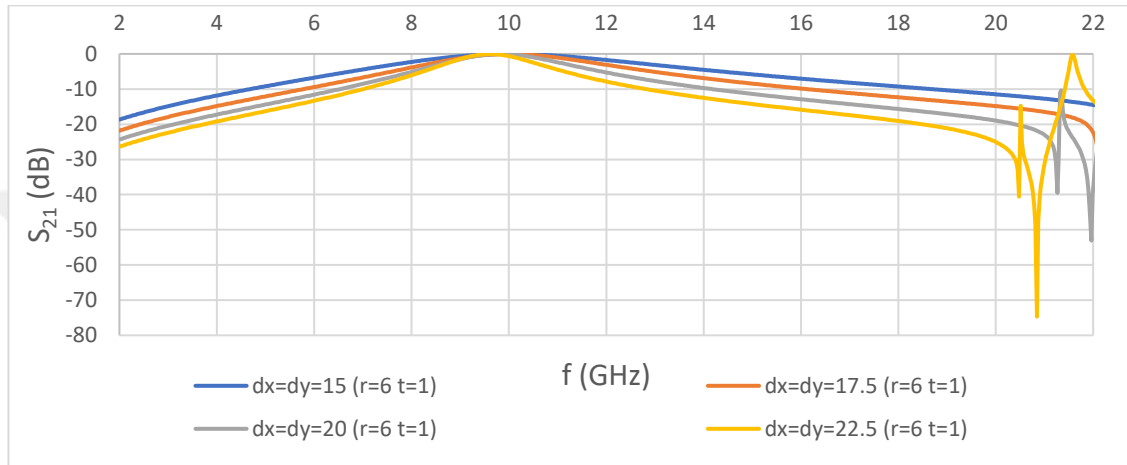


Şekil 5.8 Daire Tipi Döngü Yapısında Yarıçapa Göre Rezonans Frekansı Değişimi



Şekil 5.9 Daire Tipi Döngü Yapısındaki Kertiğe Göre Bant Genişliği Değişimi

Ayrıca Şekil 5.9, 18 GHz civarındaki ızgara loblarının kertik genişliğine bağlı olmadığını, dizi elemanları arası boşlukların bir sonucu olduğunu ortaya koymaktadır. Dizi elemanları arası boşluklar için, bitişik elemanlar arasındaki faz gecikmesi 2π 'nin katı olduğu için ızgara lobu daha düşük bir frekansta meydana gelmektedir. Dizi elemanları yakınlaştırılırsa, Şekil 5.10'da görüldüğü gibi ızgara loblarının başlangıç frekansı kaydırılabilmektedir.



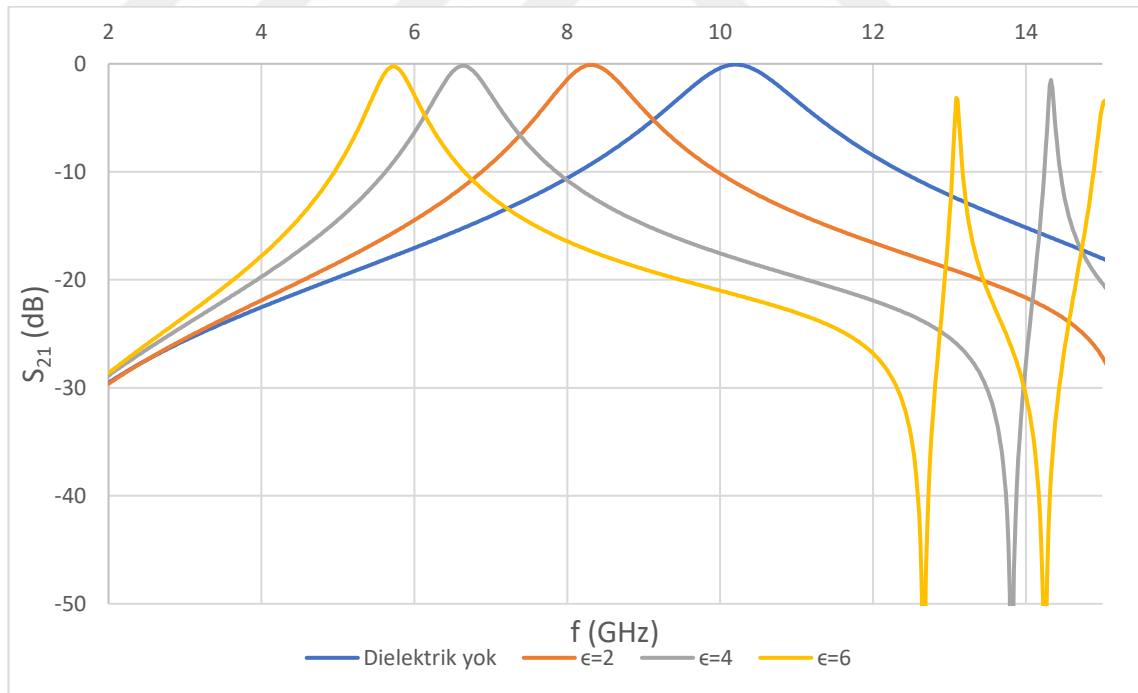
Şekil 5.10 Dizi Elemanları Arası Boşlukların Değişimi ile İletim Kaybının Değişimi (l=12 mm, t=1.2 mm)

Plaka tipi (yekpare içe sahip) periyodik yüzeyler, kare, altıgen, dairesel disk geometrileri gibi basit şekillerdeki plakaları içermektedir. Bu periyodik yüzey sınıfı kullanımı, $\lambda/2$ 'ye yakın dizi elemanları boyutları kullanımını gerektirmektedir. Geniş boşluk kullanımı da özellikle eğik geliş açıları için ızgara loblarının erken başlamasına sebep olmaktadır. Herhangi bir yükleme şekli olmayan plaka tipleri, büyük geometrileri nedeniyle periyodik yüzey tasarımında en az tercih edilen eleman ailesidir.

Kombinasyonlar ise yukarıda bahsedilen üç grubun elemanları birleştirilerek oluşturulmaktadır. Oldukça yüksek sayıda kombinasyon türetilenmektedir. Örnek olarak dört ayaklı döngü elemanının Kudüs tipi yükleme ile modifikasyonu gösterilebilir. Yüklemenin kapasitif etkisinin bir sonucu olarak, eleman boyutları ve elemanlar arası boşluk azalmaktadır. Böylece, dört ayaklı yüklü elemanın geliş açısına bağımlılığı azalmaktadır. Farklı türlerin başlıca avantajlarından yararlanmak için öğelerin herhangi bir kombinasyonu uygulanabilmektedir.

5.3 Altaşın Elektriksel Özellikleri

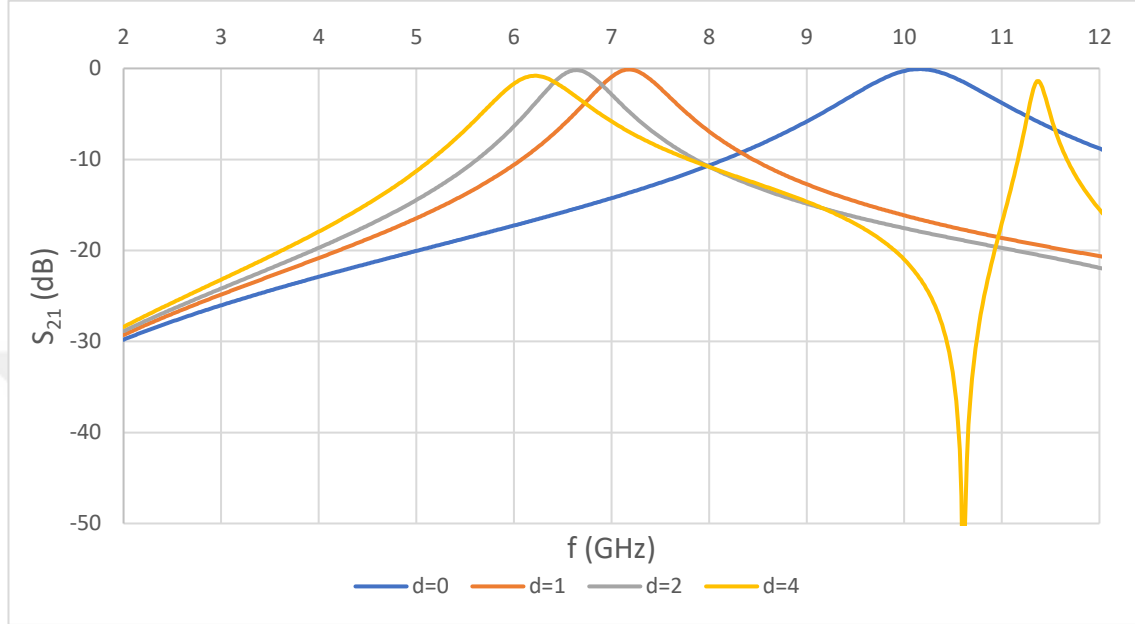
şimdiye kadar periyodik yüzeyler tek başına incelense de gerçek hayatta bir dielektrik altaş kullanımı zorunludur. Dielektrik altaş etkileri ise ilk olarak 1970’li yıllarda ortaya çıkarılmıştır. 1978 yılında periyodik yüzeylerin her iki tarafına da dielektrik levha eklenmesini içeren bir modal analiz çözümü kullanılmış ve uygun tasarımlarla rezonans frekansında ve bant genişliğinde istenmeyen değışikliklerin ortadan kaldırılabileceği gösterilmiştir (Luebbbers ve Munk 1978). Periyodik bir yüzey etrafındaki dielektrik ortam varlığı, rezonans frekansını değıştirebilmektedir. Periyodik yapı tamamen sonsuz büyüklükte olduğuunda ve bağıl (relative) dielektrik sabiti ϵ_r olan bir malzeme üzerinde kullanıldığında, rezonans frekansı $\sqrt{\epsilon_r}$ ile ters orantılı olmaktadır. Eğer sonsuz uzunluktaki dielektrik levha, sonlu ve $2d$ kalınlığındaki dielektrik levhalara indirgenirse, rezonans frekansı f_0 ve $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$ arasında bir yerde olmaktadır. şekil 5.11 incelendiğinde levha kalınlığı dalga boyuna göre oldukça küçük olsa da $d \approx 0.07\lambda_e$ rezonans frekansı $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$ değeriine oldukça yaklaşmaktadır.



şekil 5.11 Dielektrik Sabitinin Rezonans Frekansına Etkisi ($dx=dy=20$, $l=14$, $t=1$, $d=2$)

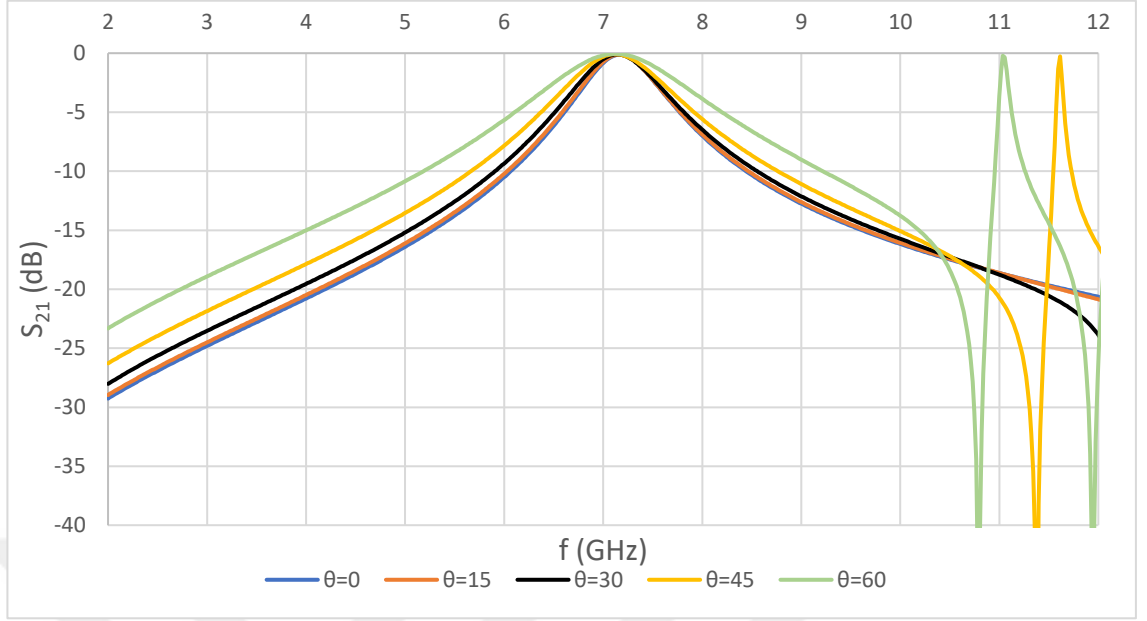
Her ne kadar oldukça küçük kalınlıklarda dielektrik eklenmesi dahi rezonans frekansını dramatik olarak değıştirirse de dielektrik altaş kalınlığı da etken parametrelerden bir

tanıdır. Şekil 5.13'te kalınlığa göre iletim kaybı değışimi gösterilmektedir. Rezonans frekansı oldukça az değışse de istenmeyen iletim bantlarının olduğu ızgara lobları da artmaktadır.



Şekil 5.12 Dielektrik Alttaş Kalınlığının Rezonans Frekansına Etkisi ($dx=dy=20$, $l=14$, $t=1$, $\epsilon_r=4$)

Filtre tasarımında karşılaşılan diğeri bir problem ise elektromanyetik dalganın geliş açısına göre performansın değışimidir. Frekans seçici yapılarının performansı genellikle dik geliş açısına göre analiz edilmektedir. Fakat özellikle mobil ya da konformal (conformal) yapılar üzerinde kullanımında geliş açısı sıklıkla değışebilmektedir. Bu sorunun çözümü için birim hücre elemanları arası boşlukların 0.4λ değeriinden daha küçük olması gerektiğı belirtilmiştir (Munk 1968). Elemanlar arası boşlukların azaltılması için yapının küçültülmesi de önerilmiştir. Bunun nedeni ise karşılıklı empedansa (mutual impedance) göre çok daha büyük olan kısa devre dipol elemanı empedansıdır. Şekil 5.13'te elektromanyetik dalganın geliş açısına göre açıklık dizisinin iletim kaybı performansı gösterilmektedir. Elektromanyetik dalga eğik geldikçe bant genişliği artmakta fakat ızgara loblarının frekansı da düşmektedir.



Şekil 5.13 Dielektrik Üzerindeki bir Açıklık Dizisinin Elektromanyetik Dalganın Geliş Açısına Göre İletim Kaybı Değişimi ($dx=dy=20$, $t=1$, $l=14$, $\epsilon_r=4$)

5.4 Kırınım Dizisi Oluşumu

Kırınım bir dalganın engel ya da açıklık ile karşılaştığında ortaya çıkan bir fenomendir. Engelin köşeleri etrafında veya açıklıktan geçen dalgaların, gölge bölgesine doğru bükülmesi olarak tanımlanmaktadır. Kırınımı oluşturan nesne, yayılan dalganın ikinci bir kaynağı haline gelmektedir. İlk olarak 1660 yılında Francesco Maria Grimaldi tarafından ifade edilmiştir. Kırınım fenomeni, yayılan dalga cephesindeki her bir noktayı küresel dalgacıkların (*wavelet*) toplamı olarak ele alan Huygens-Fresnel ilkesi ile tanımlanmaktadır. Karakteristik bükülme modeli, lazer gibi koherent bir kaynaktan gelen dalga, kendi dalga boyuna yakın bir cisim ile karşılaştığında daha belirgin olmaktadır. Bunun nedeni, etki yüzeyine farklı uzunluklardaki yollardan gelen dalga cephesinin girişimi olarak ifade edilmektedir (Anonim 2021).

Optik tayfta periyodik yapılar kırınım ızgaraları gibi davranmakta ve kırınım dizisi üretmektedirler. Şekil 5.14'te ızgara yapısının oluşturduğu kırınım dizisi gösterilmektedir. Burada merkezde oluşan parlak ışık demeti doğrudan gelen ışık

tarafından oluşturulmaktadır. Izgaraların hat genişliği $2a$, periyodu g ile ifade edildiğinde, doğrudan gelen ışık aşağıdaki formül ile hesaplanabilmektedir (Kohin vd. 1993).

$$T_{izgara}(0,0) = \frac{E(0,0)}{E} = \frac{(g - 2a)^2}{g^4} = \frac{(\text{transparan alan})^2}{(\text{toplam alan})^2} \quad (5.3)$$

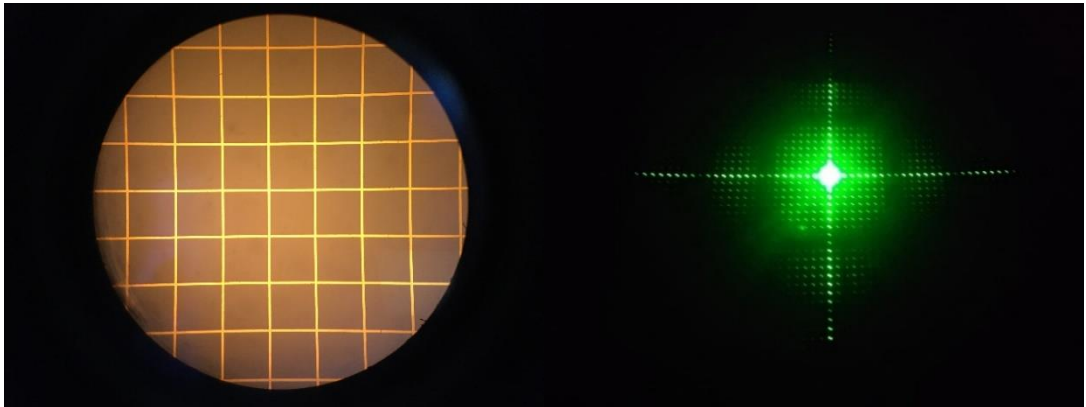
Örneğin $5 \mu\text{m}$ hat genişliğine ve $50 \mu\text{m}$ periyoda sahip olan bir ızgara yapısının optik geçirgenlik değeri %80 olmaktadır. Fakat merkezci dizi olarak adlandırılan doğrudan gelen ışık seviyesi %65.1'e düşmektedir. Tüm kırınım dizisi seviyeleri toplandığında optik geçirgenlik seviyesi elde edilebilecektir.

Izgaranın optik kapaticılığı yüzey üzerinde kapladığı alanın, toplam alana oranına eşit olsa da doğrudan gelen ışık bu oranın karesini eşit olmaktadır. Diğer bir ifade ile ızgaradan arka yüzeye geçen ışığın bir kısmı kırınıma uğramaktadır. Fakat sadece doğrudan gelen ışık anlamlı bilgi içermekte, geri kalan ışın demeti Şekil 5.14'te de görüldüğü gibi farklı bölgeleri aydınlatmaktadır. Optik yol üzerinde periyodik yapıların kullanımı:

Modülasyon transfer fonksiyonunu düşürme,

Sızıntı arka plan aydınlatma seviyesini artırma,

Sinyal gürültü oranını azaltma gibi olumsuz etkilere sebep olmaktadır.



Şekil 5.14 Izgara Yapısı ve Oluşturduğu Kırınım Dizisi

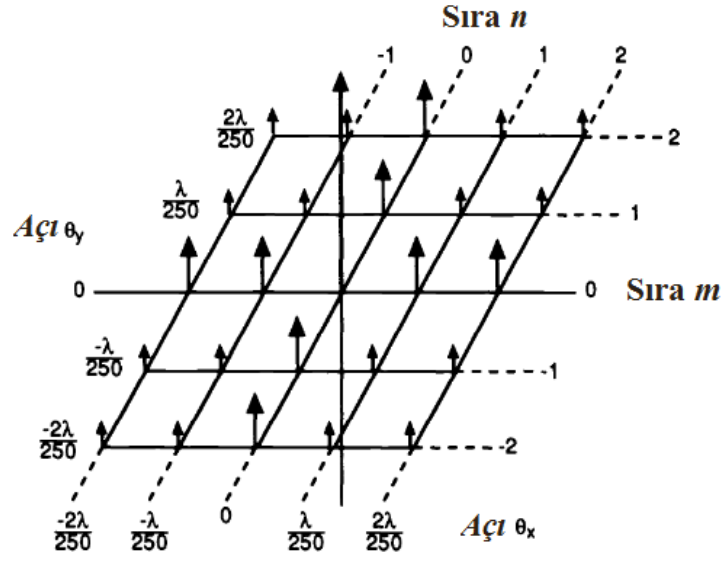
Optik sistem performans düşüşünü tahmin etmek için skaler kırınım teorisi yaklaşımı kullanılabilir. Bir optik sistemin noktasal yayılma fonksiyonu (point spread function – PSF), pupil fonksiyonunun Fourier Dönüşümü alındıktan sonra karesi hesaplanarak bulunabilmektedir (Goodman 2005). Optik hat üzerinde ızgara yapısı bulunan bir sistem için pupil fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$t(x, y) = \left[\text{rect} \left(\frac{x}{g-2a}, \frac{y}{g-2a} \right) ** \sum_m \sum_n \delta(x - ng, y - mg) \right] \text{rect} \left(\frac{x}{Ng}, \frac{y}{Ng} \right) \quad (5.4)$$

Burada ** iki boyutlu konvolüsyon fonksiyonunu, N toplam ızgara periyodu sayısını, n ve m tam sayıları (... -2, -1, 0, 1, 2, ...), $\text{rect}(x,y)$ ise 2 boyutlu dikdörtgen iletim fonksiyonunu ifade etmektedir (Gaskill 1978).

Optik sistemde ızgara kullanımından kaynaklanan sistem performansındaki bozulma noktasal yayılma fonksiyonu üzerinden hesaplanabilmektedir. Bunun için ızgara kullanıldığı durumda ortaya çıkan noktasal yayılma fonksiyonu, ağ kullanılmadığında oluşan fonksiyon ile normalize edilmektedir. Optik sistem açıklığının $(Ng)^2$ alanına sahip olduğu varsayıldığında, normalize edilmiş parlaklık dağılımı aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir (Goodman 2005):

$$I(\theta_x, \theta_y) = \frac{(g-2a)^4}{g^4} \left\{ \sum_n \sum_m \text{sinc}^2 \left[\frac{n(g-2a)}{g} \right] \cdot \text{sinc}^2 \left[\frac{m(g-2a)}{g} \right] \right. \\ \left. \cdot \text{sinc}^2 \left[\frac{Ng}{\lambda} \left(\theta_x - \frac{n\lambda}{g} \right) \right] \cdot \text{sinc}^2 \left[\frac{Ng}{\lambda} \left(\theta_y - \frac{m\lambda}{g} \right) \right] \right\} \quad (5.5)$$



Şekil 5.15 $g=250 \mu\text{m}$ için Oluşan Kırınım Dizisi (Kohin vd. 1993)

Burada θ_x ve θ_y gelen ışığın x ve y eksenleri ile yaptığı açığı, λ ise dalga boyunu ifade etmektedir. Buna göre n 'nin ve m 'nin tamsayı değerlerine karşılık $\theta_x = n\lambda/g$ ve $\theta_y = m\lambda/g$ açılarında kırınım dizisi oluşmaktadır. $g = 250 \mu\text{m}$ olduğu durumda ortaya çıkan kırınım dizisi Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Fakat bu değeri anlamlandırmak, her bir değer etkisini görmek için metalik ağ yokken oluşan noktasal dağılım fonksiyonu (*Point Spread Function* - PSF) ile normalize etmek gerekmektedir.

$$\frac{(n,m)\text{Kırınım Dizisi Enerjisi}}{\text{Metalik Ağ Olmadan PSF Enerjisi}} = \left(\frac{\frac{(g-2a)^4}{g^4} \text{sinc}^2 \left[\frac{n(g-2a)}{g} \right]}{\text{sinc}^2 \left[\frac{m(g-2a)}{g} \right]} \right) \quad (5.6)$$

g : periyot

$2a$: Hat genişliği

m,n : tam sayı

$(m,n)=(0,0)$ değerinde oluşan merkezi tepe için normalize edilmiş enerji seviyesi ise

$$T_{\text{mesh}} = \frac{E(0,0)}{E} = \frac{(g-2a)^4}{g^4} = \left[\frac{\text{Açıklık Yüzey Alanı}}{\text{Toplam Yüzey Alanı}} \right]^2 \quad (5.7)$$

olmaktadır. Örneğin üretilen B1 örneğinde kullanılan $g = 50 \mu\text{m}$, $2a = 5 \mu\text{m}$ parametrelerine göre periyodik yüzeyin toplam geçirgenliği %80 olmaktadır. Fakat merkezi kırınım dizisi değeri Çizelge 5.1’de ($m=0$, $n=0$) değeri için %65.61 olmaktadır. Diğer kırınım dizilerinde oluşan enerji değerleri toplandığında ise %80 değerine ulaşılabilir. Merkezi dizi değerini maksimize etmek için periyot artırılmalı ya da hat genişliği değeri küçültülmelidir. Bu sayede periyodik yüzeyden geçerek detektöre giden anlamlı ışık seviyesi artırabilmektedir. Çizelge 5.1’de diğer kırınım dizisi değerleri de belirtilmiştir. Enerji genellikle x ya da y ekseninde bulunmakta, çapraz terimlerin enerji seviyesi oldukça düşük olmaktadır. Şekil 5.14 incelendiğinde de optik enerjinin eksenler üzerinde toplandığı gözlemlenebilmektedir.

Çizelge 5.1 B1 Örneğinde Her Bir Dizi Elemanının Yüzdesel Enerji Değeri

	n							
		-3	-2	-1	0	1	2	3
m	-3	0.0054	0.0064	0.0071	0.5968	0.0071	0.0064	0.0054
	-2	0.0064	0.0077	0.0085	0.7089	0.0085	0.0077	0.0064
	-1	0.0071	0.0085	0.0094	0.7837	0.0094	0.0085	0.0071
	0	0.5968	0.7089	0.7837	65.6100	0.7837	0.7089	0.5968
	1	0.0071	0.0085	0.0094	0.7837	0.0094	0.0085	0.0071
	2	0.0064	0.0077	0.0085	0.7089	0.0085	0.0077	0.0064
	3	0.0054	0.0064	0.0071	0.5968	0.0071	0.0064	0.0054

İncelenmesi gereken diğer bir konu ise kırınım dizisi arasındaki açı değerleridir. Optik geçirgenlik değeri spektrofotometre ile ölçülmektedir. Ölçümlerin doğruluğu için toplama konisi açısının da bilinmesi gerekmektedir. Periyodik yüzeyden geçen merkezi

dizi, Şekil 5.14'te de görüldüğü gibi düz bir yoldan geçmektedir. Diğer kırınım dizileri ise belirli bir sapma açısı ile periyodik yüzeyin arkasına ulaşmaktadır. Spektrofotometre ile ölçüm yapılırken toplama konisi açısının dışına düşen kırınım dizisi enerjisi ise ölçülememektedir. Bu sebeple ölçülen enerji değeri, metalik ağın yüzey üzerinde kapladığı alana göre daha düşük çıkmaktadır. Kırınım açısı, dalga boyu ile doğru orantılı olduğu için, farklı dalga boylarında farklı optik geçirgenlik değerleri de ölçülebilmektedir. Yüzeye dik olarak gelen bir ışık için kırınım açıları aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Goodman 2005):

$$\sin \theta_x \approx \theta_x = \frac{n\lambda}{g} \quad (5.8)$$

$$\sin \theta_y \approx \theta_y = \frac{m\lambda}{g} \quad (5.9)$$

$g = 50 \mu\text{m}$ ve $2a = 5 \mu\text{m}$ ızgarası için bu $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ ve $\lambda = 3 \mu\text{m}$ dalga boyu için kırınım açıları Çizelge 5.2'de ve Çizelge 5.3'te belirtilmiştir.

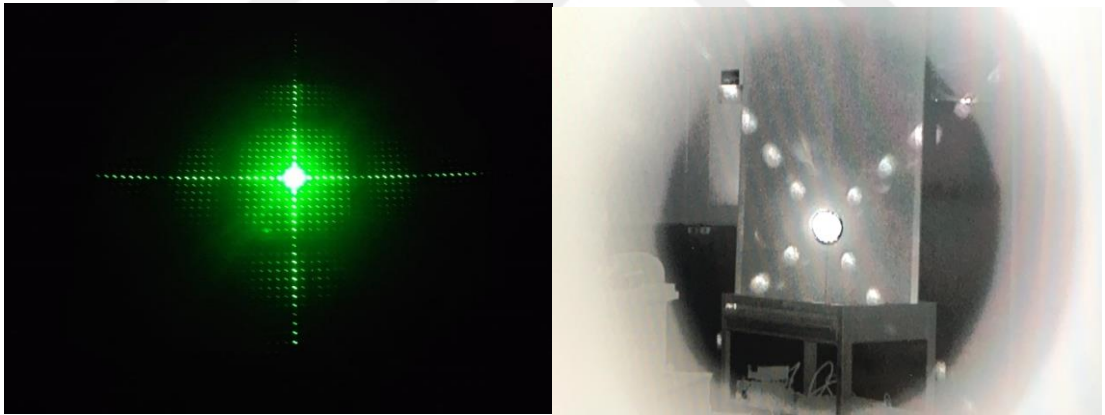
Çizelge 5.2 $g=50 \mu\text{m}$ ve $2a=5 \mu\text{m}$ Örneğinde $0.5 \mu\text{m}$ Dalga Boyu için Oluşan Kırınım Açıları

	n				
		0	1	2	3
m	0	0.00	0.57	1.15	1.72
	1	0.57	0.81	1.28	1.81
	2	1.15	1.28	1.62	2.07
	3	1.72	1.81	2.07	2.43

Çizelge 5.3 $g=50\text{ }\mu\text{m}$ ve $2a=5\text{ }\mu\text{m}$ Örneğinde $3\text{ }\mu\text{m}$ Dalga Boyu için Oluşan Kırınım Açıları

	n				
		0	1	2	3
m	0	0.00	3.44	6.88	10.31
	1	3.44	4.86	7.69	10.87
	2	6.88	7.69	9.72	12.39
	3	10.31	10.87	12.39	14.59

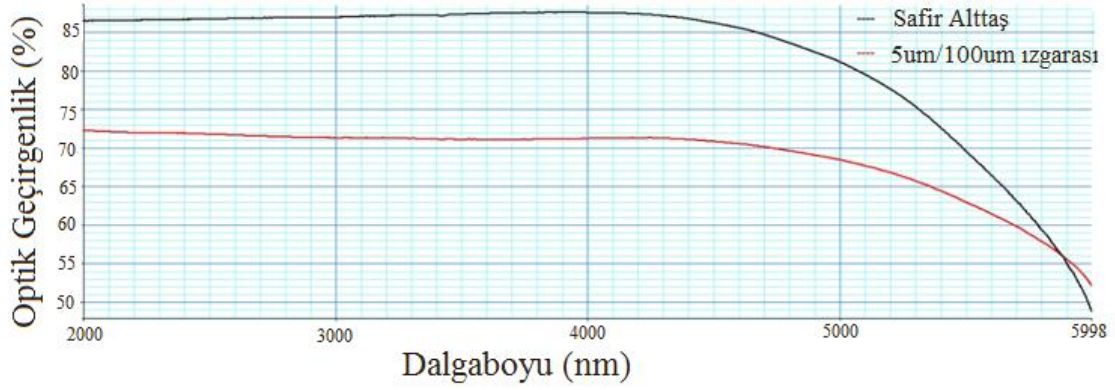
Sonuçlar incelendiğinde $0.5\text{ }\mu\text{m}$ dalga boyu ile kırınım açıları birbirine daha yakın olurken, dalga boyu $3\text{ }\mu\text{m}$ 'ye geldiğinde açılarının arttığı gözlenmektedir. Bu durumda kırınım dizileri arasındaki mesafenin artması beklenmektedir. Şekil 5.16'da yeşil renkli 510 nm dalga boyuna sahip lazer ve 2900 nm dalga boyuna sahip MWIR lazer kullanımında kırınım dizisi değişimi gösterilmektedir. Buna göre dalga boyu arttıkça kırınım dizilerinin birbirinden uzaklaşması etkisi açıkça görülebilmektedir.



Şekil 5.16 Yeşil (510 nm) ve MWIR (2900 nm) Dalga boyuna Sahip Lazer Kullanımında Kırınım Dizisi Değişimi

Bu ızgaranın optik geçirgenlik grafiği ise Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Buna göre $4\text{ }\mu\text{m}$ için ölçülen geçirgenlik değeri yaklaşık olarak %81, $2\text{ }\mu\text{m}$ için ölçülen optik geçirgenlik değeri ise yaklaşık %83 olmaktadır. $2\text{ }\mu\text{m}$ için %83 değeri ilk 3 terimin toplamı olurken, $4\text{ }\mu\text{m}$ için %81 değeri ilk 2 terimin toplamı olmaktadır. Buna göre spektrometrenin konik huzmesinin genişliğinin %2.29 ile %3.24 aralığında olduğu söylenebilmektedir.

PerkinElmer Lambda 950 UV/VIS spektrometre cihazının konik huzme genişliği %3 olarak belirtilmiştir. Bu değer ölçümler ve analizler ile uyumludur.



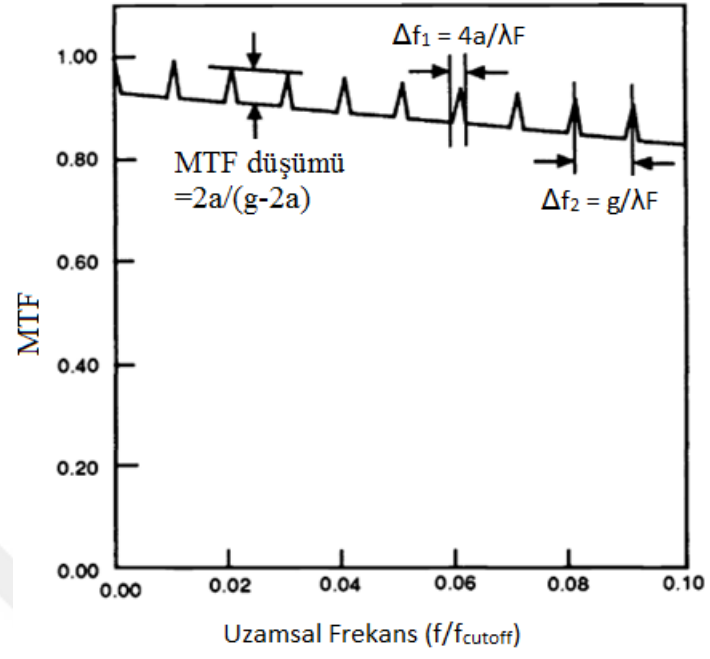
Şekil 5.17 $g=100 \mu\text{m}$, $2a=5 \mu\text{m}$ Izgara İçin Optik Geçirgenlik Ölçüm Sonucu

5.5 MTF Değişimi

Optik hatta kullanılan metalik ağ yapıları, iletimi azaltmaya ek olarak modülasyon transfer fonksiyonunu (MTF) da değiştirmektedir. MTF, pupil fonksiyonunun otokorelasyonu ile üretilmektedir (Kurmer 1990). Izgara yapısının MTF'e etkisi ani yükselişler (spike) olarak kendisini göstermektedir (Marconi ve Franklin 1914). Şekil 5.18'de üçgensel yükseliş görülebilmektedir. MTF üzerindeki değişim ise şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$\frac{\Delta MTF}{MTF} = \frac{-2a}{g - 2a} \quad (2a \ll g \text{ için}) \quad (5.10)$$

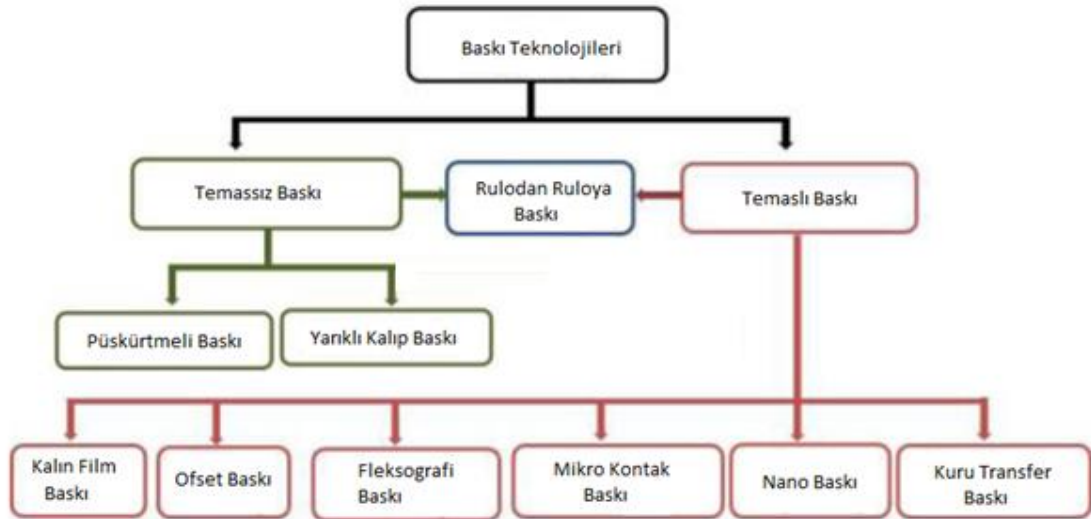
$2a = 5 \mu\text{m}$ ve $g = 100 \mu\text{m}$ olan ızgara için bu değer %5.3 mertebesinde olmaktadır.



Şekil 5.18 Izgara Yapısının MTF'e etkisi (Kohin vd. 1993)

6. BASKI TEKNOLOJİLERİ

Baskı teknolojileri, farklı sıcaklıklarda çeşitli elektronik malzemelerin işlenmesi için uygun maliyetli yollar sağlayarak, esnek/bükülebilir sensörler ve elektronik malzemelerin gelişmesine yardımcı olmaktadır. Basitleştirilmiş işleme adımları, azaltılmış malzeme israfı, düşük üretim maliyetleri ve basit desenleme teknikleri, baskı teknolojilerini uygun maliyetli üretim için çok çekici kılmaktadır (Nathan vd. 2012). Basılı elektroniğin bu özellikleri, araştırmacıların malzeme işleme için yeni yollar keşfetmelerine ve geleneksel silikon alttaşı (*wafer*) tabanlı üretim teknikleriyle gerçekleştirilmesi zor olan düzlemsel olmayan yüzeylerde bile sensörler ve sistemler geliştirmelerine olanak sağlamaktadır. Esnek alttaşlar üzerindeki basılı elektronik devreler veya protez eller gibi yüzeye uyumlu hassas elektronik sistemleri mümkün kılmaktadır (Dahiya 2013). Polimer alttaşlar üzerindeki basılı elektronik devreler, standart silikon alttaştan daha büyük alanlarda elektroniklerin üretimi için yeni yollar açmaktadır. Elektronik endüstrisi yol haritasına uygun olarak, bu alandaki araştırmalar yavaş yavaş mikroelektronik ve baskı teknolojilerinin birleşimine doğru ilerlemektedir (Dahiya 2014).



Şekil 6.1 Baskı Teknolojileri

Baskı elektroniği ve sensörler için geleneksel yaklaşımlar, bir modülün önceden desenli parçalarının esnek alt alttaşlarla temas ettirilmesini ve bunların üzerine işlevsel mürekkeplerin veya solüsyonların aktarılmasını içermektedir (Radha vd. 2013).

Baskı/kaplama sisteminin geliştirilmesi için genellikle izlenen iki ana yaklaşım, Şekil 6.1'de gösterildiği gibi temaslı ve temassız baskı olarak ifade edilebilmektedir. Temaslı baskı işleminde, mürekkepli yüzeylere sahip desenli yapılar, alttaş ile fiziksel olarak temas ettirilmektedir. Temassız baskıda ise solüsyon/mürekkep, açıklıklar veya enjektörler aracılığıyla yüzeye uygulanmaktadır. Yapılar ve alttaş önceden programlanmış bir modelde hareket ettirilerek tüm yüzeye uygulanmaktadır. Temaslı baskı teknolojileri, gravür baskı, gravür-ofset baskı, fleksografik baskı ve rulodan ruloya (roll to roll) baskıdan oluşmaktadır. Öne çıkan baskı teknikleri ise kalın baskı film, püskürtmeli baskı ve yarıklı kalıp baskı olarak ifade edilebilmektedir. Temassız baskı teknikleri, basitlik, maliyet, hız ve üretim sürecine uygulanabilirlik gibi özellikleri nedeniyle daha fazla ilgi görmektedir (Pease 2008). Son zamanlarda, nano baskı, mikro temaslı baskı ve transfer baskı gibi yeni ortaya çıkan polimerik damga bazlı baskı yöntemleri, özellikle esnek elektroniklerin tasarımı konusunda ilgi çekmektedir (Ali 2014).

Bu bölümde çeşitli baskı tekniklerini bir arada incelenmeye çalışılacaktır. Her teknolojinin kritik sınırlamaları ifade edilmeye çalışılacaktır. Kullanılacak baskı tipi, elde edilen cihazların veya sensörlerin ve yapıldıkları malzemelerin (organik/inorganik) elektriksel özelliklerine göre de değişebilmektedir. Çoğu zaman, baskı teknolojilerinin avantajları, bunlarla ilgili zorlukları gölgede bırakmaktadır. Baskı teknolojilerinin çoğu ortak işleme tekniklerini kullandığından, bir yöntemin sınırlamaları diğerlerinin avantajlarıyla aşılabilmektedir.

İnce film cihazlarının baskı ya da kaplanması yoluyla geliştirilmesi, işleme adımlarını basitleştirmek, konuma özel biriktirmeyi kolaylaştırmak ve üretim hızını artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Fonksiyonel materyallerin kimyasal solüsyonu veya nano partikülleri, çoğu baskı teknolojisinde koloidal çözelti formunda bulunmaktadır. Bu çözeltiler, kontrollü dağıtma prosesleri kullanılarak alttaşlar üzerinde biriktirilmekte veya basınç ve hız kullanılarak alttaş üzerine kaplanmaktadır (Moonen vd. 2012). Baskı tekniklerinin en önemli faydası, çözümün tek adımda tanımlanan yere uygulanmasıdır. Böylece malzeme israfları azalmaktadır. Baskı teknolojilerinin bir diğer faydası da rulodan ruloya baskı tekniği ile çok sayıda elektronik bileşenin düşük maliyetle

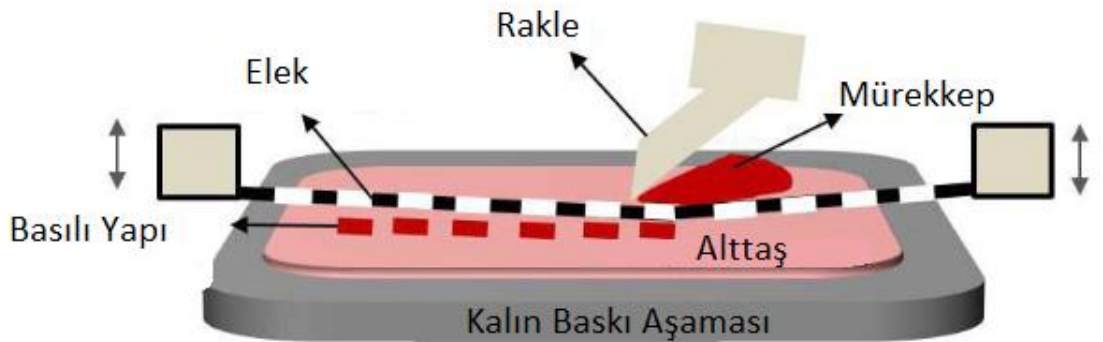
üretilmesini sağlamasıdır. Baskı teknolojileri, Şekil 6.1'de gösterildiği gibi iki geniş kategoriye ayrılmaktadır.

6.1 Temaslı Baskı Teknolojileri

6.1.1 Kalın film baskı

Kalın film baskı, elektronik endüstrisinde uzun süredir metalik ara bağlantıları baskılı devre kartlarına basmak için uygulanmaktadır. Bu sebeple basılı elektronikler için popüler ve olgunlaşmış teknolojilerden bir tanesi olarak öne çıkmaktadır. Diğer baskı araçlarına kıyasla daha hızlı ve çok yönlü üretim tekniğidir. Üretim sürecine basitlik, düşük maliyet, hız ve esneklik katmaktadır. Kalın film baskı ile elde edilen sonuçlar, birkaç adım tekrarlanarak yeniden üretilebilmekte ve optimum çalışma zarfı hızla geliştirilebilmektedir (Søndergaard vd. 2013).

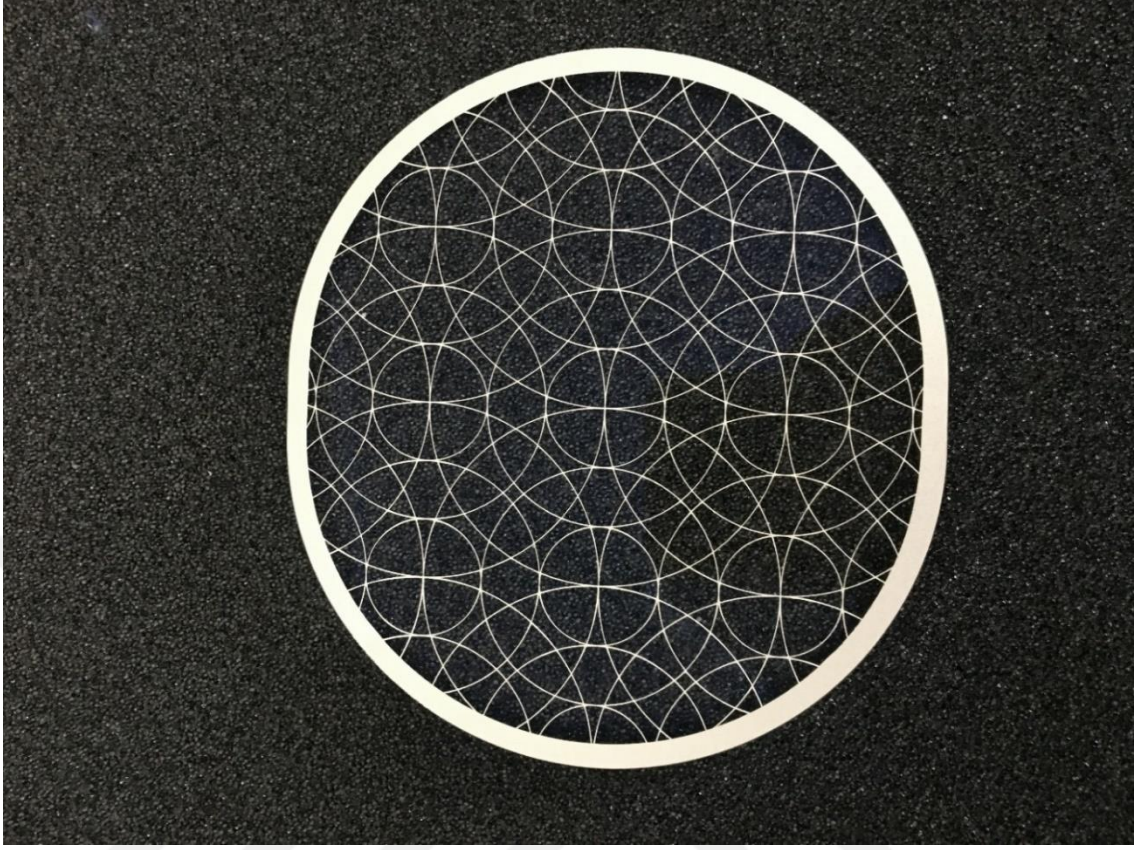
Şekil 6.2'de düz yataklı kalın baskı film yapısı gösterilmektedir (Søndergaard vd. 2013). Düzenek rakle, elek ve alttaştan oluşan basit bir yapıya sahiptir. Öncelikle alttaş üzerine alttaş yerleştirilmekte, alttaşın da üzerine elek konmaktadır. Elek üzerine oda sıcaklığında akışkan halde bulunan mürekkep dökülmekte ve rakle yardımıyla mürekkep yayılmaktadır. Elek yapısının boşluklarından geçerek mürekkep alttaşa ulaşarak istenilen deseni oluşturmaktadır. Şekil 6.2'deki basılı yapılar deseni ifade etmektedir. Oluşan desenli alttaş çeşitli sıcaklıklarda tavlamanarak katılaşmaktadır.



Şekil 6.2 Kalın Baskı Bileşenleri

Aynı yapı dönerli şekilde de tasarlanabilmekte ve daha hızlı üretim yapılabilir. Ancak dönerli yapı için elek maliyeti yüksek ve tekrar kullanımı zahmetli olmaktadır (Søndergaard vd. 2013). Çok basit bir teknik olmasına rağmen baskı kalitesi ve özellikleri, mürekkep viskozitesi, baskı hızı, rakle açısı ve geometrisi, elek ile alttaş arasındaki kopma, ağ boyutu ve malzeme gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Soukup vd. 2012). Kalın film baskı genellikle yüksek viskoziteli mürekkeplerle uyumlu olmaktadır. Çünkü düşük viskoziteli mürekkepler, elekten geçerken dağılabilmekte ve düzgün bir desen oluşturamayabilmektedir (Moonen vd. 2012). Literatürde 50-100 µm baskı çözünürlüğü belirtilmesine rağmen 100 µm altında tekrarlanabilir üretim yapmak güçleşmektedir.

Şekil 6.3'te kalın film baskı prosesi örneği gösterilmektedir. Dikkatli incelendiğinde kenar noktalarındaki çizgi genişlikleri ile orta noktalardaki çizgi genişliklerinin aynı olmadığı fark edilebilmektedir. Proses sırasında alttaşı tutmak için genellikle fikstür kullanılmaktadır. Kullanılan fikstürün alttaşı sıkı tutmaması ya da eğimi nedeniyle düzlemsellik hataları oluşabilmektedir. Rakle örnek üzerinde geçerken bu hatalar alttaşın bazı bölgelerde daha yakın, bazı bölgelerde de daha uzak mesafeden mürekkeple buluşmasına sebep olmaktadır. Ek olarak mürekkep yüzeyde hala akışkan durumda olduğundan, tavlama kadar geçen sürede yayılabilmektedir. Bu gibi durumlar da çizgi genişliklerinin bir miktar değişmesine sebep olmaktadır.

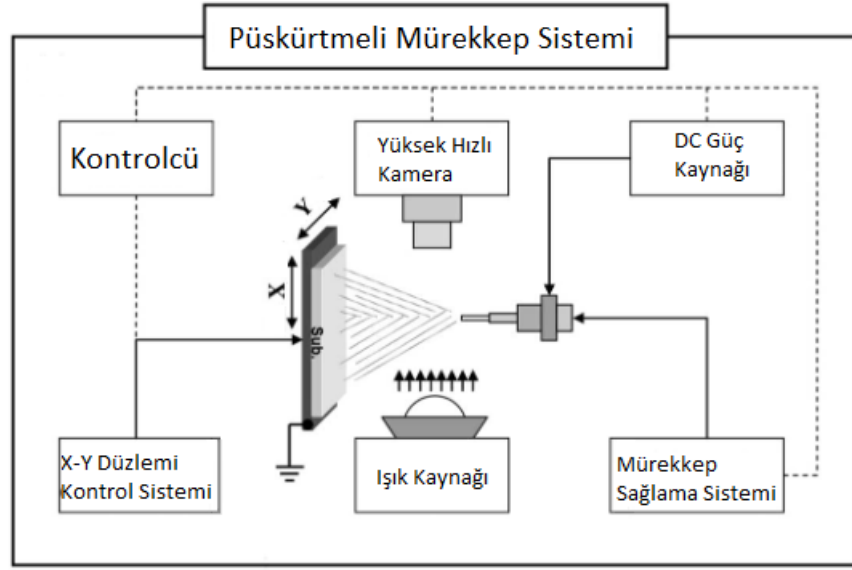


Şekil 6.3 Kalın Film Baskı Örneği

6.2 Temassız Baskı Teknolojileri

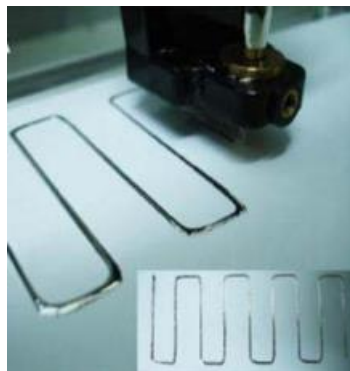
6.2.1 Püskürtmeli baskı

Püskürtmeli baskı, çözelti bazlı malzeme birikiminin doğrudan modellenenebildiği hızlı bir tekniktir. Kolloidal veya kimyasal çözelti formundaki mürekkepler, mikrometre boyutunda bir inkjet enjektör kafası ile püskürtülerek kaplanmaktadır. Püskürtmeli enjektörün çalıştırılması ve hareketi için bir dizi mekanizma geliştirilmiştir. Bunlar arasında en öne çıkan teknikler termal, piezoelektrik ve elektrohidrodinamik mürekkep püskürtme sistemleridir. Çok küçük boyutlu damlacıklar mürekkep püskürtmeli enjektörden termal veya piezoelektrik aktüatörler yardımıyla püskürtülmektedir (Singh vd. 2010). Şekil 6.4'te örnek bir püskürtmeli mürekkep sistemi gösterilmektedir. Bu sistemin en temel özelliği koni şeklinde kararlı bir yapı oluşturması olarak tanımlanmaktadır.



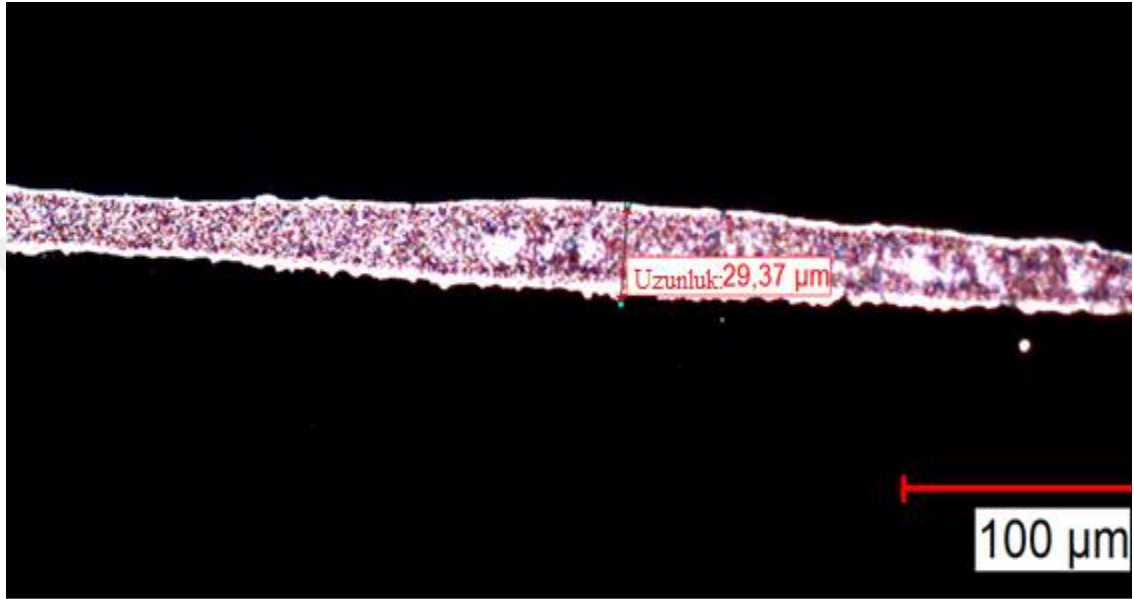
Şekil 6.4 Püskürtmeli Mürekkep Sistemi

Bu teknik kullanılarak nanometre aralığındaki kalınlık, sadece enjektör ve alttaş arasındaki mesafe ile elektrik alan değeri artırılarak elde edilebilmektedir. Bu teknik, bir dizi elektronik cihazın imalatında ve biyolojik sistemlerde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Khan vd. 2011). Püskürtmeli baskı, diğer tekniklerle karşılaştırıldığında genellikle kanal bölgesinde kısmi düzgün dağılım göstermektedir. Daha çok değişken yapıda az muntazam morfolojilerle sonuçlanmaktadır (Yan vd. 2009). Baskı kalitesi mürekkebin kimyasal kararlılığına, sıcaklık kontrolüne, proses optimizasyonuna göre değişebilmektedir.



Şekil 6.5 Püskürtmeli Baskı Örneği

Şekil 6.6’da kalın film baskının mikroskop altındaki görüntüsü paylaşılmaktadır. Buradaki yapıda kenarların pürüzlü ve orta noktaya yaklaştıkça yüksekliğin arttığı anlaşılabilmektedir. Ayrıca püskürtme kaynaklı hat olmayan bölgelerde fde mürekkep damlaları gözlenmektedir.



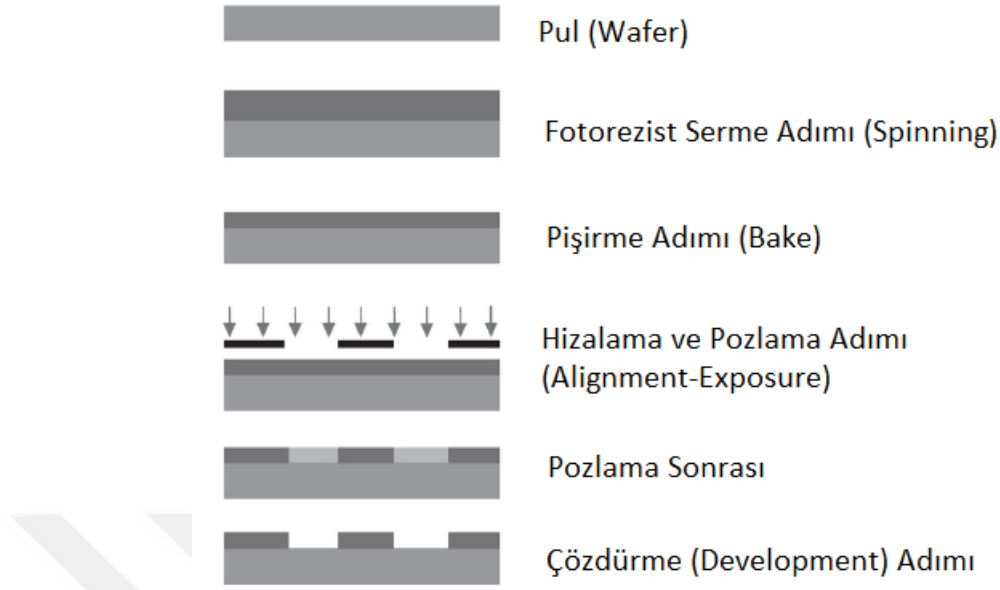
Şekil 6.6 Püskürtmeli Mürekkep Baskının Mikroskop Görüntüsü

6.2.2 Fotolitografi

Litografi kelime anlamı olarak Yunanca kökenli taş ve baskı kelimelerinden oluşmaktadır. Anlam olarak ise taş üzerine yazmak, şekil işlemek demektir. Günümüzde ise bir alttaş üzerine, tasarımı yapılan bir çizimin aktarımı olarak düşünülmektedir. Optik litografi, bir çizimin, UV dalga boyuna duyarlı bir çeşit polimer kaplanmış alttaş üzerine aktarılması demektir. UV dalga boyuna sahip bu polimere fotorezist adı verilmektedir. Prosesin içeriğine göre farklı fotorezistler kullanabilmektedir. Bugün, dünya çapında 400 milyar dolarlık bir endüstri olan yarı iletken endüstrisi tarafından nano-elektronik üretiminde en yaygın olarak kullanılan litografi işlemidir. Optik litografinin her yerde yaygın kullanımı, çok kısa sürede çok büyük miktarda desenin aktarılmasına izin veren paralellenebilir doğasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, modern bir öncü tarayıcının (saatte 150-300 mm pul (wafer) ve 40 nm iki boyutlu desen çözünürlüğü) özellikleri göz

önüne alındığında, piksel çıktısının saniyede yaklaşık 1.8T piksel olduğu bulunabilmektedir. Optik litografi yeteneklerindeki sürekli gelişmeler, son 50 yılda yaşadığımız bilgi işlem devrimini mümkün kılmaktadır. Optik litografi alanında hem dalga boyu hem de optik konfigürasyonda geniş bir uygulama çeşitliliği bulunmaktadır. Dalga boyları, görünür ve ultraviyole bantlardan aşırı ultraviyole (EUV) ve hatta yumuşak X ışınlarına kadar değişebilmektedir. Ek olarak, kırınım sistemleri, girişim ve taramalı prob litografisi (*Scanning Probe Lithography*) gibi uygulamalar için kullanılabilmektedir (Yelboğa 2012).

Optik litografide malzeme üzerine desen işleme, ışığa duyarlı bir polimer ve bu dalga boyuna ayarlı bir ışık kaynağı yardımıyla yapılmaktadır. Işığa duyarlı polimer fotorezist olarak adlandırılmaktadır ve genellikle morötesi dalga boyu tercih edilmektedir. Fotolitografi prosesi adımları Şekil 6.7’de gösterilmiştir. İlk olarak örnek yüzeyinin temizlenmesi gerekmektedir. Temizlik sonrasında yüzeyde herhangi bir toz ya da bozulma olmaması gerekmektedir. Fotorezist seçiminde kalınlık, pozitif ya da negatif olması ve hangi ışık türüne duyarlı olduğu gibi kritik özelliklerin dikkatle seçilmesi gerekmektedir. Sonrasında yüzey üzerine fotorezist malzemesi dökülerek tüm yüzeye eşit olarak yayılmasını sağlamak gerekmektedir. Serim işlemi genellikle pul belirli bir hızda dönerken üzerine dökme şeklinde olmaktadır. Bu işlem bir *Spinner* (Çevirici) cihazı vasıtası ile yapılabilmektedir. Homojen bir serim işlemi için fotorezist akışkanlığı, uygulama şekli ve dönü hızı gibi parametrelerin optimize edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Serim işleminin ardından pişirme adımında sıcak bir tabla üzerinde sertleşmeye bırakılmaktadır. Bu aşamada hem fotorezist sertleşmekte aynı zamanda polimerin içindeki Azor hava kabarcıkları atılmaktadır. Pul üzerinde sertleştirilen fotorezist, maske hizalama ve pozlama adımında şekillendirilmektedir. Kullanılan yarıiletken maske camı soda/lime ya da kuartz tabanlı olabilmektedir. Dolayısıyla pozlama işlemi de fotorezist türüne ve yarıiletken maske tipine göre farklılık gösterebilmektedir.

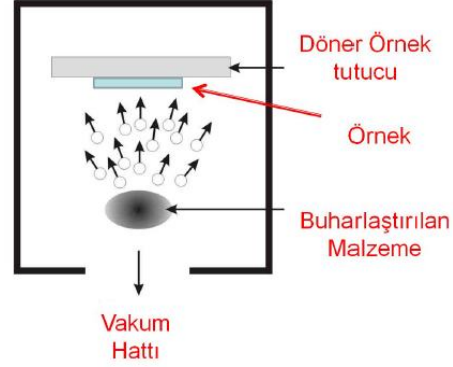


Şekil 6.7 Fotolitografi Prosesi Adımları

Fotolitografi işlemi sonrasında metalik ağ yapısını oluşturabilmek için alttaş üzerine metal kaplanmaktadır. Yarıiletken fabrikasyonunda yüzey kaplamaları iki farklı yöntem ile yapılabilir. Bunlardan birisi Fiziksel Buhar Biriktirme (*Physical Vapor Deposition* - PVD) Yöntemi iken diğeri Kimyasal Buhar Biriktirme (*Chemical Vapor Deposition* - CVD) Yöntemidir. CVD Yöntemi en eski yüzey kaplama yöntemlerinden birisidir. Bu yöntem kısaca, vakum altında bulunan bir alttaşın, buhar fazındaki farklı malzemelerin reaksiyona girerek kaplanması ile meydana gelir. Kaplama sırasında alttaş sıcaklığının yüksek olması gerekmektedir. Genellikle kaplama sıcaklığının 300°C-1200°C arasında olması gerekir. Metal kaplamalarında ise genellikle Fiziksel Buhar Biriktirme-PVD sistemleri kullanılır. CVD sisteminde kaplanacak malzemelerin gaz fazındaki kaynakları kullanılırken, PVD sisteminde kaplanacak malzemelerin katı fazındaki kaynakları kullanılmaktadır. PVD sistemi temel olarak vakum altında bir çember içerisinde alttaş üzerine kaplanacak malzemelerin buharlaştırılması veya atomizasyonu ile meydana gelmektedir.

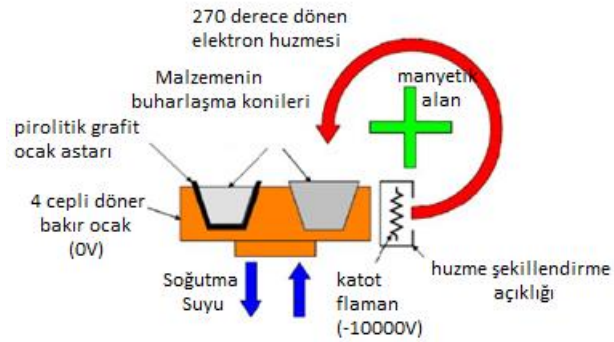
En sık kullanılan buharlaştırma yöntemleri Termal Buharlaştırma (*thermal evaporation*), Elektron Demeti Buharlaştırma (*E-Beam Evaporation*) ve Kopartma (*sputtering*) olarak

bilinmektedir. Termal buharlaştırma yönteminde bir kabin içerisinde altta ve yığın haldeki metal birlikte koyulmaktadır. Vakum altında bulunan kabinde metal üzerinden akım geçirilerek buharlaştırılmaktadır. Buharlaştıran metal altta yüzeyine ve kabin duvarlarına tutunmaktadır. Uygulama süresine göre metal kalınlığı değiştirilebilmektedir. Şekil 6.8’de termal buharlaştırma sistemi örneği gösterilmektedir (Yelboğa 2012).



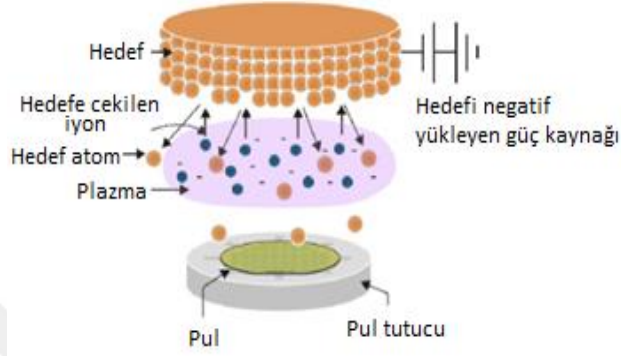
Şekil 6.8 Termal Buharlaştırma Yöntemi

Elektron demeti buharlaştırma sisteminde ise bir elektron kaynağı ve manyetik alan kullanılmaktadır. Şekil 6.9’de gösterildiği gibi vakum altındaki bir çember içerisinde bulunan tungsten flama ısıtılarak flamadan elektron kopması sağlanmaktadır. Sonrasında manyetik alan yardımıyla elektronlar metal yığını üzerine düşürülerek metal yığının ısınması ve ardından buharlaşması sağlanmaktadır. Buharlaştırılan metal, termal buharlaştırmada olduğu gibi döner tutucu yardımıyla homojen olarak toplanabilmektedir.



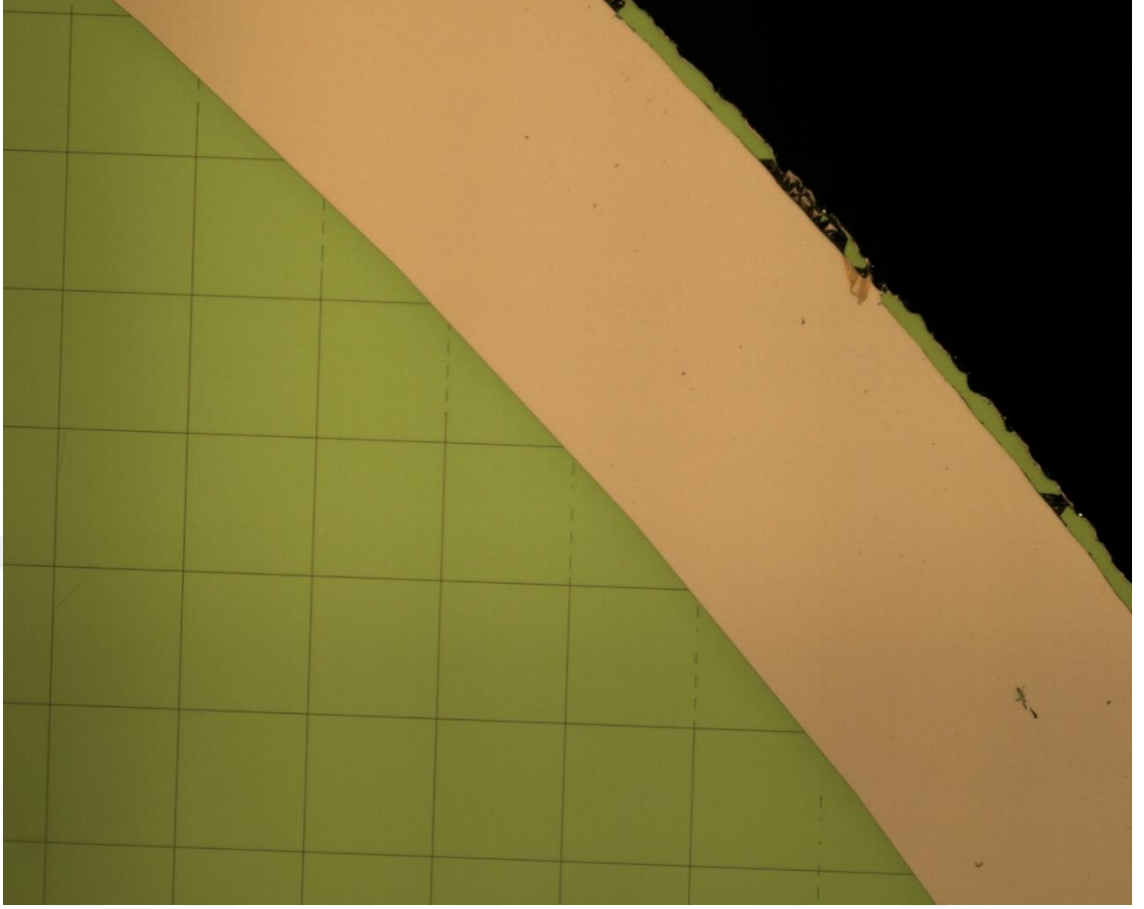
Şekil 6.9 Elektron Demeti Buharlaştırma Yöntemi

Kopartma yönteminde ise plazma oluşturularak kaplama gerçekleştirilmektedir. Vakum altındaki bir kabinde Argon iyonları metal malzemeye çarptırılmaktadır. Kopan metal iyonları elektrik alan yardımıyla pul yüzeyine yönlendirilmektedir. Argon iyonlarını oluşturmak için yüksek plazma yoğunluğu gerekmektedir. Bu nedenle kabinin vakum seviyesi oldukça düşüktür. Şekil 6.10’de kopartma yönetimi sistemi gösterilmektedir.



Şekil 6.10 Kopartma Yöntemi

Şekil 6.11’te fotolitografi prosesine ait mikroskop görüntüsü gösterilmektedir. Kenar bölgelerde bazı hatların sürekliliğinde bozulma gözlenmektedir. Bu durum proste morötesi ışınla pozlama hatasından kaynaklanmaktadır. Bu bölgelere yeterli ışın uygulanamadığından kaldırma işlemi esnasında fotorezist ile birlikte metal kaplama da kalkmaktadır (Yelboğa 2012).



Şekil 6.11 Fotolitografi Prosesi Mikroskop Görüntüsü

7. ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Bir yapının elektromanyetik özelliklerini ve elektromanyetik dalgaya tepkisini tanımlayabilmek için elektriksel iletkenlik, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Metal ağ yapıları, alttaş üzerinde boşluklu bir yapı oluşturmaktadır. Ağ yapısının olduğu bölge metal kaynaklı iletkenlik kazanmakta, diğer bölgeler ise alttaş ile aynı özelliğe sahip olmaktadır. Optik geçirgenliğe sahip BK7, safir, çinko sülfat gibi malzemeler yalıtkan özelliğe sahip olmaktadır. Dolayısıyla alttaş yüzeyinin kazandığı iletkenlik sadece metal kaynaklı olmaktadır. Önceki bölümde anlatıldığı gibi litografi prosesi sırasında metal buharlaştırılarak tüm yüzeye eşit oranda uygulanması sağlanmaktadır. Yüzey üzerindeki birikme, yığın halindeki metal ile aynı yoğunlukta olmadığından iletkenlik değeri de bir miktar düşmektedir. Literatürde bu değer 1/2 - 1/10 aralığında değişebileceği belirtilse de numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde 1/3 oranında iletkenlik düşüşü tespit edilmiştir (Günay vd. 2021).

Elektriksel iletkenlik (*conductivity*, σ) bir malzemenin elektrik akım taşıyabilme kapasitesi ile ifade edilmektedir. Malzemeye ait serbest elektron kapasitesi ne kadar yüksekse, iletkenlik de o oranda yüksek olmaktadır. Tanım olarak elektriksel öz direncin (*resistivity*, ρ) tam tersidir:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (7.1)$$

Burada iletkenlik S/m olarak ifade edilirken öz direnç ise Ωm olarak ifade edilmektedir.

Bir maddenin dielektrik özelliği, elektrik alan uygulandığındaki enerji depolama yeteneğine göre sınıflandırılmaktadır (Yang vd. 2008). Dışarıdan uygulanan E elektrik alanı için, elektrik akı yoğunluğu D şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (7.2)$$

Burada dielektrik sabiti olan ϵ , mutlak elektriksel geçirgenlik (*absolute permittivity*, ϵ_0) ve bağıl elektriksel geçirgenlik (*relative permittivity*, ϵ_r) olarak ifade edilmektedir.

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (7.3)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-7} F/m \quad (7.4)$$

Elektriksel geçirgenlik (*permittivity*) ise bir malzemenin elektrik alan ile ilişkisini tanımlamaktadır ve karmaşık bir niceliktir:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (7.5)$$

Elektriksel geçirgenliğin reel kısmı (ϵ'_r), malzemede elektrik alan kaynaklı ne kadar enerji depolandığının bir ölçüsüdür. Elektriksel geçirgenliğin sanal kısmı ise (ϵ''_r) bir kayıp faktörüdür ve bir malzemenin harici elektrik alan içerisinde ne kadar dağıtıcı veya kayıplı olduğunun bir ölçüsüdür. Elektriksel geçirgenliğin sanal kısmı her zaman sıfırdan büyüktür ve reel kısımdan her zaman küçüktür. Kayıp tanjantı veya $\tan\delta$ ise dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma oranı olarak tanımlanmaktadır:

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} = \frac{\text{Döngü başına kaybedilen enerji}}{\text{Döngü başına depolanan enerji}} \quad (7.6)$$

Elektriksel geçirgenliğe benzer şekilde manyetik alanın bir malzeme ile etkileşimi, manyetik geçirgenlik (μ) parametresiyle tanımlanabilmektedir. Bağlı manyetik geçirgenliğin reel kısmı malzemenin manyetik enerji depolama kabiliyetini, sanal kısmı ise kayıp terimini ifade etmektedir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu'_r - j\mu''_r \quad (7.7)$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m \quad (7.8)$$

Gerçek hayattaki malzemelerin çoğu manyetik değildir. Bu nedenle manyetik geçirgenlik değerleri de serbest uzay geçirgenliğine oldukça yakın olmaktadır. Demir, nikel ve kobalt gibi bazı malzemeler bu duruma istisnadır ve kayda değer manyetik özellikler sergilemektedir. Öte yandan neredeyse tüm malzemeler dielektrik özelliklere sahip

olmaktadır. Bu sebeple manyetik geçirgenlik (permeability) genellikle ihmal edilmekte ve dielektriksel geçirgenlik ve iletkenlik parametrelerine odaklanılmaktadır.

MIL-STD 285 ve IEEE 299 standartları düzlem dalga ekranlama etkinliğinin ölçümü ile ilgili ekranlı oda (shielded room) duvarı ve boynuz (horn) anten kullanılarak ölçülmesini yönelik prosedür tanımlamaktadır (Ott 1988), (Hayt ve Buck 2017). Gerçek düzlem dalga sonucu elde edebilmek için ölçülen örneğin boyutunun, serbest uzay dalga boyunun 3-5 katı olması gerekmektedir. Bu gereksinim, ölçümün en düşük frekansını sınırlandırmaktadır. 750 MHz’te ölçüm alabilmek için yaklaşık 2 m boyutlarında örneğe ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat tasarım aşamasında bu boyutlarda çıktı üretebilmek çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Özellikle nano teknoloji çıktısı olan grafen, iletken katkılama yapılan plastik malzemeler, nanometre mertebesinde kalınlıklara sahip film kaplamaları bu boyutlarda üretmek mümkün olmamaktadır. Koaksiyel tutucu, dikdörtgen dalga kılavuzu gibi yöntemler belirli şartlar altında düzlem dalga ekranlama etkinliği sonuçları elde edebilmektedir. Aynı zamanda bu yöntemlerde dalga boyuna göre oldukça küçük örnekler kullanılabilmektedir.

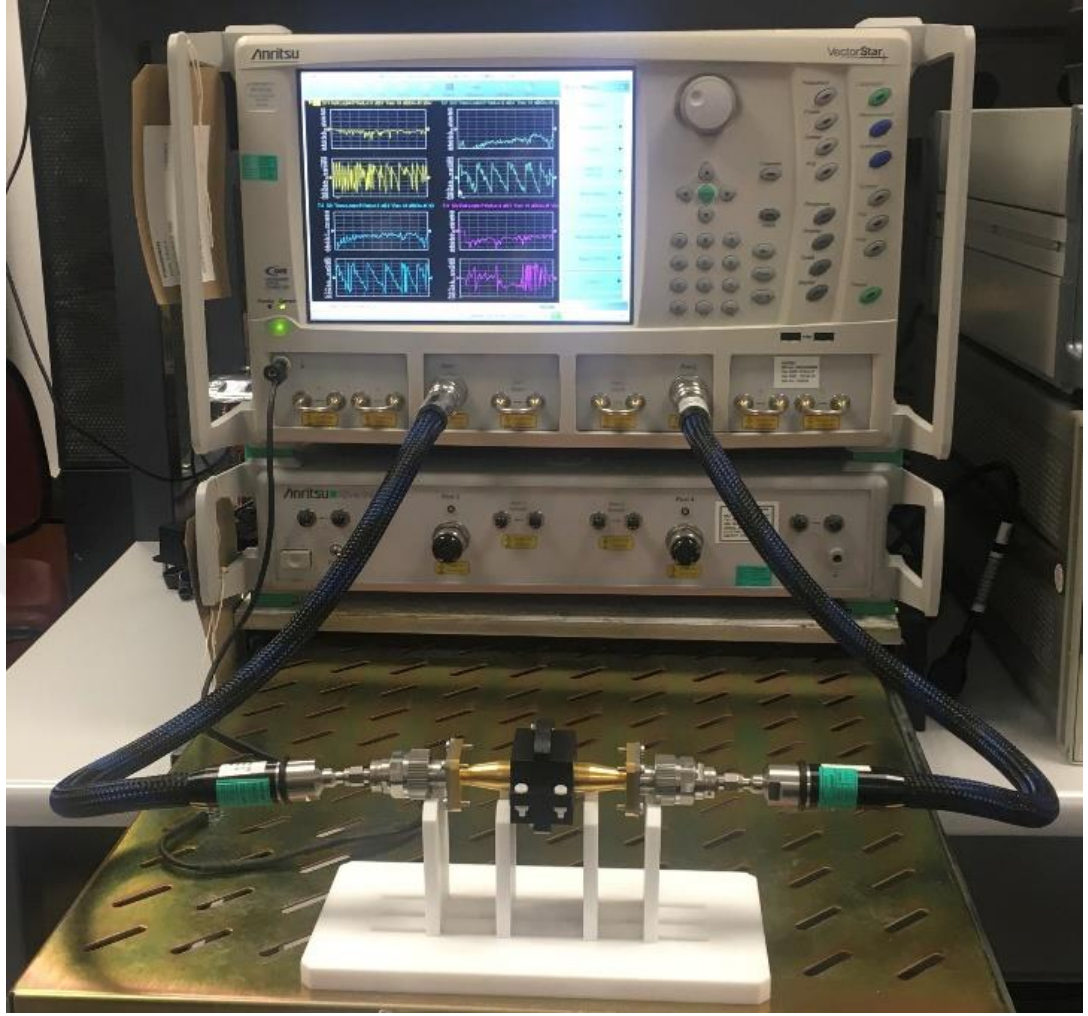
Bu bölümde ekranlama etkinliğinin ölçülmesinde kullanılabilecek yöntemlerden bahsedilecektir.

7.1 Koaksiyel Tutucu Yöntemi

Düzlemsel malzeme ve kaplamalar için ekranlama etkinliği ve dielektrik sabiti ölçme yöntemlerinden birisi de koaksiyel tutucu yöntemidir (*coaxial holder method*). Koaksiyel tutucu yönteminin detayları ASTM-D4935 standardında belirtilmektedir. Buna göre koaksiyel tutucu test yöntemi malzemenin uzak alan ve düzlemsel dalga koşullarındaki ekranlama etkinliği değerinin ölçülmesi için bir prosedür sunmaktadır. Uzak alan koşulunun sağlanamadığı durumlarda elektriksel olarak ince numuneler için manyetik alan ekranlama değeri (SE_M) hesaplanabilmektedir (Sarto ve Tamburrano 2006), (Vasquez vd. 2009). Uzak alan ekranlama etkinliği değeri de bu değerler kullanılarak hesaplanabilmekte ancak bunların geçerliliği ve uygulanabilirliği üzerine tartışmalar devam etmektedir. Yöntem standartta 30 MHz – 1.5 GHz frekans bandında geçerli

bulunmaktadır fakat bu sınırlar kesin değildir. Düşük frekanslarda kapasitif bağlaşımın (*capacitive coupling*) azalmasına bağlı olarak yer değıştirme akımının (*displacement current*) azalması, TEM modları dışındaki modların oluşmasına (*overmodding*) sebep olmaktadır. Bu nedenle düşük frekanslardaki sınırlar gerçek sınır olarak ortaya çıksa da yüksek frekanslar için koaksiyel tutucu boyutları ve tasarımı belirleyici olmaktadır. Bu sayede farklı tasarımlar yapılarak yüksek frekans limiti artırılabilir. Bu yöntem elektriksel olarak ince ($<\lambda/100$) ve izotropik malzemeler için iletkenlik, elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik ölçümlerinde kullanılabilir. Dikkat edilmesi gereken konulardan birisi de yakın alan ve uzak alan geçişinin keskin olmamasıdır. Genel olarak $\lambda/2\pi$ değeri ayırıcı parametre olarak kullanılabilir. Bu değerin altında ikinci yansımalar ve saçılmalar olduğu için ölçüm sonuçları etkilenebilir (ASTM-D4935 1999).

Bu çalışmada kullanılan test düzeneğinin ve örneklerin görünümü Şekil 7.1’de verilmiştir. Koaksiyel tutucu tasarımı ilgilenilen frekans bandına göre değışebilmektedir. Fakat bu çalışmada 1” ve 3” olmak üzere 2 adet koaksiyel tutucu kullanılmıştır. Koaksiyel tutucu, 50 Ω ’luk karakteristik empedansı korumak için konik hatlara ve karşı tutucu ile eşleşen boşluklara sahip olmalıdır. Hat empedansının $\pm 0.5 \Omega$ ’dan daha fazla sapması, ölçüm belirsizliğini artırmaktadır. Bu nedenle daha yüksek sapmaların düzeltilmesi önerilmektedir. Tasarımın 3 adet kritik parametresi bulunmaktadır. Bunlardan ilki iç taraftaki örneği tutan flanjlı yapıdır. Bu yapı sayesinde malzemeye kapasitif bağlaşım ile yer değıştirme akımı uygulanabilir. İkinci parametre ise ölçüm örneği ile aynı kalınlıkta ve elektriksel özelliklerdeki referans örneğidir. Burada ölçüm örneği tutucu arasına yerleştirildiğinde ortaya çıkan süreksizlik oluşturulmaya çalışılmaktadır. Referans örnek, koaksiyel tutucunun boşluk olan kısımlarında elektromanyetik enerji akışına etki etmeyecek şekilde boşluklu olmalıdır. Son parametre ise koaksiyel tutucuyu birbirine bağlayan vidaların yalıtkan (nylon) olmasıdır. Bu sayede yer değıştirme akımının iletim akımı tarafından baskılanması ve hatalı sonuçlar elde edilmesi engellenmektedir.



Şekil 7.1 1” Örnek Boyutları ile Kullanılan Koaksiyel Tutucu Test Düzenegi



Şekil 7.2 3” Örnekler için Tasarlanan Koaksiyel Tutucu

Ölçüm cihazı olarak standartta sinyal üretici ve spektrum analizör kullanımı önerilmektedir. Fakat birden fazla noktada ölçüm alınması gerektiğinde ölçüm cihazlarının harici bir yazılım ile kontrol edilmesine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu durumda ağ analizörü daha uygun bir alternatif olabilmektedir. Koaksiyel tutucunun konektör ile bağlantısı sırasında 50Ω empedansı sağlamak zorlu olabilmektedir. Konektör bölgesindeki yansımaları engellemek amacıyla zayıflatıcı kullanımı önerilmektedir. Fakat kullanılan zayıflatıcıların dinamik aralığı (*dynamic range*) düşüreceği ihmal edilmemelidir. Dinamik aralık sınırlarına yaklaşıldığı durumda hassas ve ayarlanabilir zayıflatıcı kullanımı daha faydalı olacaktır.

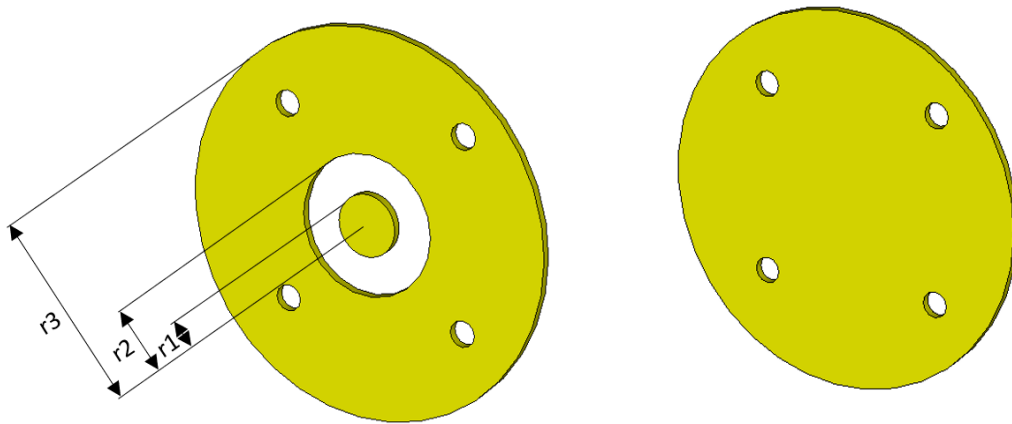
Malzeme ve kalınlık bakımından aynı özelliklere sahip referans ile yük örneklerinin kullanılması gerekmektedir. Şekil 7.4’te referans ve yük örneklerinin temsili görünümü paylaşılmıştır. Örnek boyutlarının tutucudan dışarı taşması herhangi bir teknik problem yaratmamaktadır.

Ölçüm güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği için en önemli parametrelerden birisi örnek kalınlığıdır. ‘Aynı kalınlık’ koşulu standartta tanımlanmaktadır. Buna göre örnek üzerindeki farklı noktaların ortalama kalınlık farkı $25 \mu\text{m}$ ’den daha az olmalıdır. Aynı

zamanda örnek üzerinde ve örnekler arası (referans örnek ve yük örneği) kalınlık değişimi %5'in altında olmalıdır. Bu şartları sağlayan referans ve yük örneklerinin aynı kalınlıkta olduğu kabul edilebilmektedir. Kalınlık ile ilgili bir diğer sorun ise kalınlık arttıkça yüksek seviye modların uyarılması sebebiyle hatalı sonuçlar ortaya çıkmasıdır (Sarto ve Tamburrano 2006). Bu durumu engellemek için ölçülen örnek kalınlığının, deri kalınlığından çok daha küçük olması gerekmektedir $t < \lambda/100$ (ASTM-D4935 1999). Buna göre Çizelge 7.1'de belirli frekanslar için elektriksel olarak ince örnek kalınlıkları ve uzak alan – yakın alan geçiş değerleri paylaşılmıştır. Buna göre 18.2 GHz'e kadar ölçüm alabilmek için örnek kalınlığının en çok 0.165 mm olması gerekmektedir. Fakat örnek boyutu büyüdükçe kırılma artacağı için gerek üretim gerekse test aşamalarında dikkatli olunması gerekmektedir.

Çizelge 7.1 Elektriksel Olarak İnce Örnek ve Yakın Alan – Uzak Alan Geçiş

Frekans f (GHz)	Maksimum Örnek Kalınlığı t (mm)	Dalga boyu λ (mm)	Uzak Alan – Yakın Alan geçişi (mm)
1.5	2	200	31.83
5	0.6	60	9.55
8	0.375	37.5	5.97
13.5	0.222	22.2	3.54
18.2	0.165	16.5	2.62



Şekil 7.3 Referans (Solda) ve Yük (Sağda) Örnekleri

Karakterize edilmek istenilen malzeme homojen ya da homojen olmayan, tek katmanlı ya da çok katmanlı, iletken ya da yalıtkan olabilmektedir. Homojen olmayan malzeme ölçümleri geometri ve yönelim (*orientation*) bağımlı olduğundan sonuçların tekrarlanabilirliği daha düşük olmaktadır.

Şekil 7.1’de detayları gösterilen düzeneğe düzlemsel malzemelerin araya girme kaybı (*insertion loss*) ekranlama etkinliği olarak kullanılabilir. Araya girme kaybı ise referans (P_{ref}) ve yük (P_{load}) örneklerinin güç iletimleri kullanılarak tanımlanabilmektedir (Sarto ve Tamburrano 2006). Ölçüm ve yük örneklerinin detayları ise Şekil 7.2’de belirtilmektedir.

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{ref}}{P_{load}} \quad (7.9)$$

Ölçümler vektör ağ analizörü ile yapıldığında ise S_{21} parametreleri kullanılarak ekranlama etkinliği hesaplanabilmektedir.

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \frac{S_{21ref}}{S_{21load}} \quad (7.10)$$

Yük ve referans numuneleri ile yüklenen koaksiyel fikstürün eşdeğer devreleri sırasıyla Şekil 7.3(a) ve (b)’de gösterilmiştir (Wilson ve Ma 1988) (Catrysse vd. 1992). R_1 , R_2 , R_3 ve R_4 parametreleri, numuneler ve flanşlar arasındaki temas dirençlerini, C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 parametreleri ise koaksiyel tutucu ve numuneler arasındaki kapasitif eşleşmenin etkilerini temsil etmektedir. C_5 parametresi, iki flanş arasındaki doğrudan bağlantıyı simüle etmekte; Z_0 ise kayıpsız dielektrik dolu koaksiyel iletim hattının içsel empedansına karşılık gelmektedir. Z_0 parametresi aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Vasquez vd. 2009):

$$Z_0 = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (7.11)$$

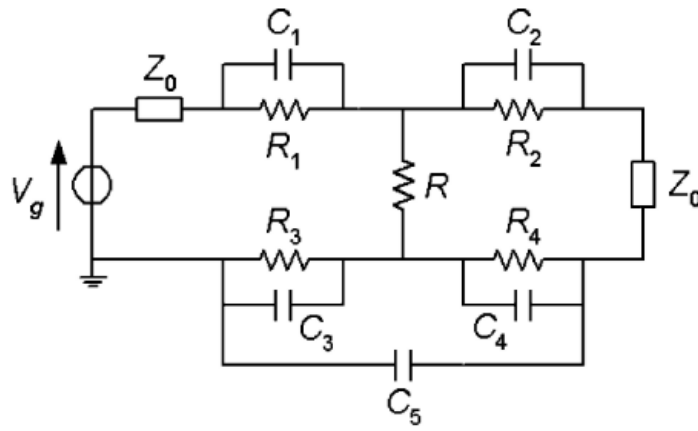
Z_0 : serbest uzay empedansı

r_1 : Koaksiyel tutucu iç iletken yarıçapı

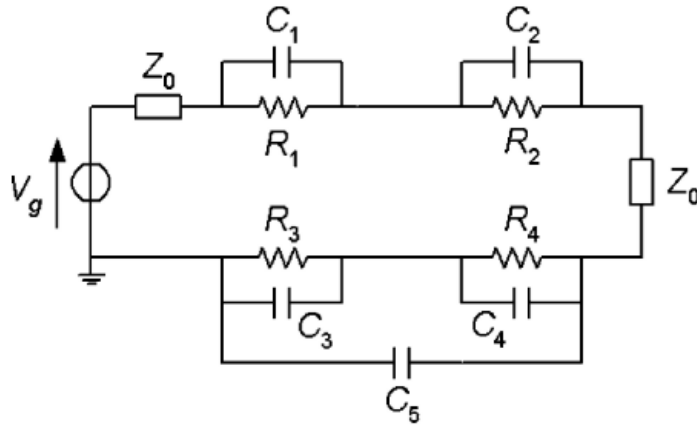
r_2 : Koaksiyel tutucu dış iletkenin iç yarıçapı

ϵ_r : Koaksiyel tutucu iç ve dış iletkenler arasındaki malzemenin reel dielektrik sabiti

Koaksiyel tutucu iletkenleri arasında hava olması durumunda $\epsilon_r = 1$ olarak alınabilmektedir. Fakat iletkenler arasında farklı bir malzeme kullanıldığında, koaksiyel tutucu empedansı üzerinde etkili olmaktadır. Bu sayede yarıçap değerlerine ek olarak bir tasarım parametresi daha eklenmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7.4 a) Yük Örneği ile yüklenen Koaksiyel Tutucu Eşdeğer Devresi b) Referans Örneği ile Yüklenen Koaksiyel Tutucu Eşdeğer Devresi

Şekil 7.4a’da belirtilen R direnci ise yük örneğinin bulunduğu durumu belirtmektedir. R direnci ise aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$R = \frac{1}{2\pi\sigma d} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (7.12)$$

σ : örnek iletkenliği ($\sigma \gg \omega\epsilon_0\epsilon_r$)

d : örnek kalınlığı ($d \ll \delta$)

Z_i empedansı, R_i ve C_i bileşenlerinin paralel kombinasyonunu ifade ederken $Z_0 \gg Z_i$ ve $C_5 \ll C_3, C_4$ olduğu durumda araya girme kaybı aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Sarto ve Tamburrano 2006):

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_0}{2R} \right| \quad (7.13)$$

$|Z_0/2R| = (\eta_0 d \sigma / 2) \gg 1$ varsayımında yukarıda ifade edilen araya girme kaybı formülü, düzlem dalga durumundaki sonsuz boyuttaki örneğin araya girme kaybını ifade etmektedir. İyi iletkenler için bu varsayım geçerli olmaktadır.

$$IL_{dB} = SE_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_0}{2R} \right| \quad (7.14)$$

Çaprazlama (transverse) elektrik modu TEM için üst kesim frekansı f_c aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir (ASTM-D4935 1999):

$$f_c = \left(\frac{n}{\pi} \right) \left(\frac{c}{r_1 + r_2} \right) \quad (7.15)$$

n : pozitif tam sayı, esas mod için 1

c : ışık hızı

ASTM standardında belirtilen 1.5 GHz frekans limitini aşabilmek için Çizelge 7.2’de koaksiyel tutucuya ait r_1 , r_2 ve r_3 boyutlarının değerleri ve kesim frekansları belirtilmektedir. r_1 ve r_2 değerleri iki kısıtlama tarafından belirlenmektedir. Bunlardan ilki, koaksiyel tutucunun karakteristik empedansının değiştirilmemesi gerektiğidir. İkincisi ise test düzeneğinin maksimum çalışma frekansı f_{max} ’a kadar yalnızca baskın TEM modu yayılması gerektiğidir. Diğer bir ifade ile f_{max} , değeri yukarıda detayları

belirtilen f_c kesim frekansından daha düşük olmalıdır. $Z = 50 \Omega$ değeri için r_1 ve r_2 yarıçapları frekansla ters orantılı olarak küçülmektedir.

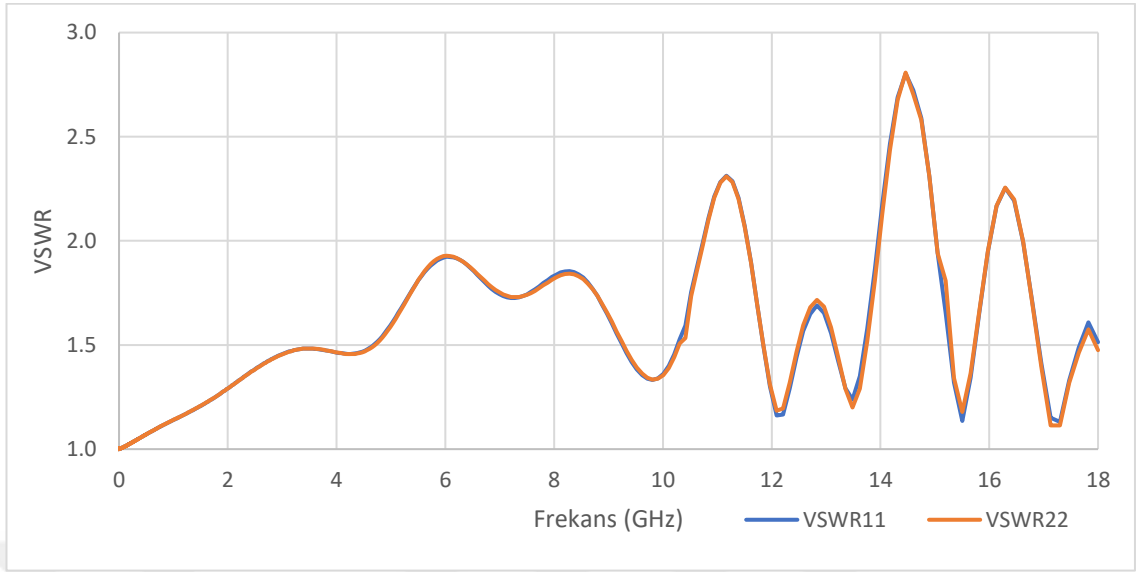
Çizelge 7.2 Farklı Koaksiyel Tutucu (KT) Boyutları için Kesim Frekansı Değerleri

	r_1 (mm)	r_2 (mm)	r_3 (mm)	f_c (GHz)
Standart KT	16.5	38.1	64	1.75
KT1 (Sarto ve Tamburrano 2006)	3.5	8	39	8.3
KT2 (Sarto ve Tamburrano 2006)	3.5	8	22	8.3
KT3 (Vasquez vd. 2009)	1.59	3.66	15.24	18.2
1" KT (Aselsan)	5	11.6	25.4	11.5
3" KT (Aselsan)	11.5	26.5	45	2.5

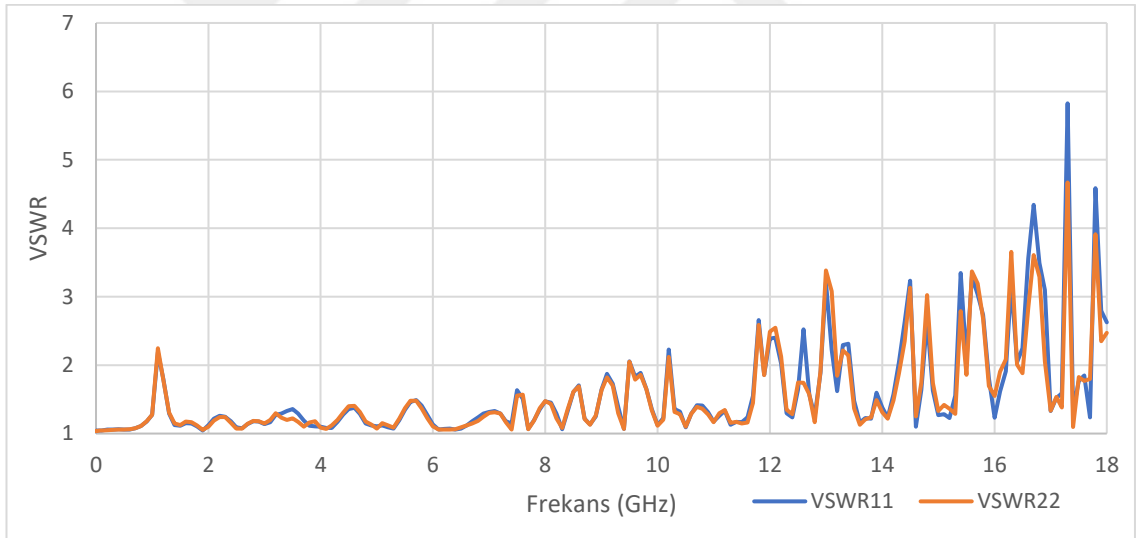
Kritik parametrelerden birisi ise dış yarıçap r_3 'ün seçimi olmaktadır. Bu değer araya girme kaybı ölçümünü belirgin şekilde etkilemektedir. Bir tarafta, Koaksiyel tutucunun iki bölümü arasındaki kapasitif bağlaşımı artırmak için r_3 'ün büyüklüğü etkili olmaktadır. Buna göre r_3 arttıkça kapasitans artmaktadır. Öte yandan, daha küçük r_3 değerleri kullanımını öne çıkaran iki durum olmaktadır (Sarto ve Tamburrano 2006):

- i) test numune boyutlarını sınırlama ve üretimi kolaylaştırma
- ii) Ölçüm bandı içindeki rezonans frekanslarından kaçınma

Şekil 7.3b'de belirtilen C_5 parametresinin değerini düşük tutmak için numunenin flanş yüzeylerini tamamen kaplaması gerekmektedir. Koaksiyel tutucu yük ve referans örnekleri ile yüklendiğinde kesme frekansı altındaki frekanslar da rezonansların gözlenebileceği belirtilmektedir (Sarto ve Tamburrano 2006). Bu tür rezonansların frekansı ve genliği esas olarak r_3 'ün değerine, numunenin kalınlığına ve dielektriksel geçirgenliğine bağlı olmaktadır (Tamburrano ve Sarto 2004). Ayrıca, ASTM-D4935 standardı tarafından tavsiye edildiği gibi, tutucunun iki bölümünü birbirine bağlamak için kullanılan iletken olmayan vidaları barındıran flanş delikleri, özellikle r_3 yarıçapının düşük değerleri için, araya girme kaybı ölçümünü etkileyebilmektedir (Sarto ve Tamburrano 2006).



Şekil 7.5 1” Örnekler için Kullanılan Koaksiyel Tutucu VSWR ölçümleri



Şekil 7.6 3” Örnekler için Kullanılan Koaksiyel Tutucu VSWR ölçümleri

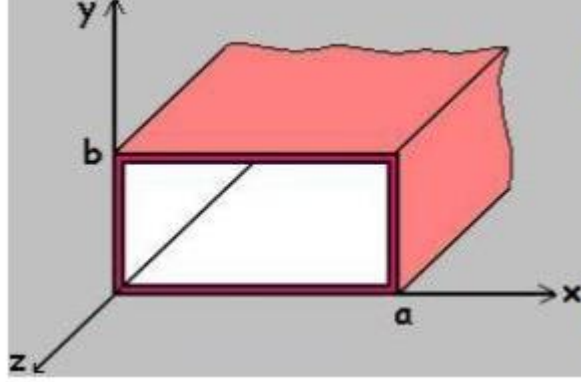
Şekil 7.5’te ve Şekil 7.6’da ölçümlerde kullanılan Koaksiyel tutuculara ait Duran Dalga Gerilim Oranları (VSWR) belirtilmiştir. 1” boyutlarındaki örneklerle kullanılan Koaksiyel tutucu 10.7 GHz frekansına kadar 2’den daha düşük VSWR değerine sahip olmaktadır. Sonrasında ise bu değer dalgalanmaktadır. Çizelge 7.2’de belirtilen değer ile Şekil 7.4’teki veriler birbiriyle örtüşmektedir. 3” boyutlarındaki örnekler için kullanılan Koaksiyel tutucunun ise yaklaşık olarak 9.5 GHz frekansına kadar VSWR değeri 2’den

daha düşük ölçülmektedir. Sonrasında ise 10.5 GHz – 11.5 GHz frekans aralığında olduğu gibi sadece dar frekans bantlarında kullanılabilmektedir. Şekil 7.5'te 1 GHz civarındaki empedans uyumsuzluğu kaynaklı bir tepe bulunmaktadır. Bu tepe fikstür tasarımından kaynaklanmaktadır ve tüm ölçümlerde karşımıza çıkmaktadır. Fikstüre ait duran dalga gerilim oranı 10.7 GHz'e kadar uygun olsa da Çizelge 7.2'de belirtilen 2.5 GHz'ten sonra TEM modu yapısı bozulduğundan ölçümlerde sapma olması beklenmektedir.

Koaksiyel tutucu fikstürünün ilk kullanımdan önce $50 \pm 0.5 \Omega$ empedansına sahip olduğunun doğrulanması gerekmektedir. Bunun için standartta yansıtıcılık değerlerinin zaman alanında ölçülmesi önerilmektedir. Zaman alanının kullanılmasının sebebi ise sorunlu bölge hakkında da bilgi vermesidir. Böylelikle tasarımın hangi aşamalarının düzeltilmesi gerektiği de ortaya çıkmaktadır. Başka bir öneri de her kullanımdan önce ekranlama etkinliği bilinen bir referans malzeme ile ölçüm sisteminin doğrulanmasıdır. Bu sayede oluşabilecek hatalı ölçümlerin önceden tespiti amaçlanmaktadır. Standart bir mylar üzerine altın kaplama uygulanması durumunda tüm sistem doğrulanabilmektedir. Buradaki kaplamanın yüzey direnci $5 \Omega/\square$ olduğunda ekranlama etkinliğinin 32 ± 3 dB olması beklenmektedir. Buradaki değer kaplamalar için kullanılan ekranlama etkinliği formülü ile hesaplanabilmektedir.

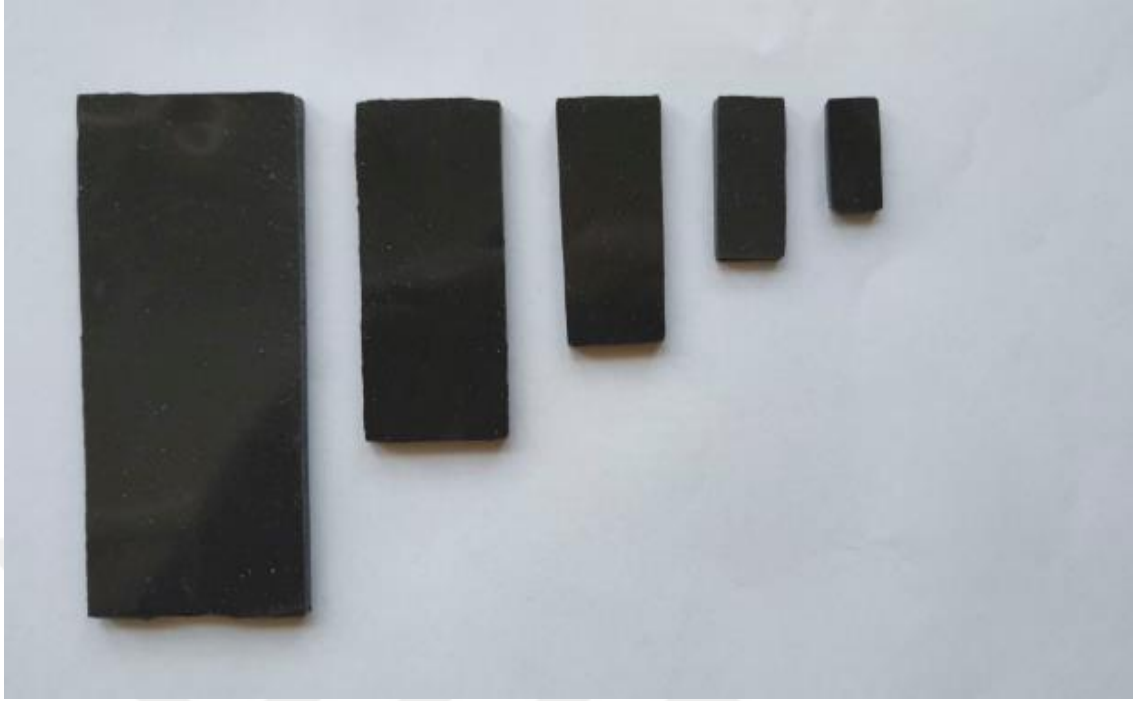
7.2 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu Metodu

Dikdörtgen dalga kılavuzları tek iletken bulundurmamasından dolayı TEM dalga modunu desteklememektedir (Cheng 1989). Sadece TE (transverse electric) ve TM (transverse magnetic) dalga yayılımına imkân vermektedir. Dikdörtgen dalga kılavuzu yaygın olarak S bant (3-30 GHz) ve daha yüksek frekanslarda mikrodalga sinyallerinin iletilmesi için kullanılmaktadır. Dikdörtgen dalga kılavuzundaki alanlar, dalga kılavuzunun elektriksel boyutlarına bağlı olan bir dizi yayılma modundan oluşmaktadır. Bu modlar genel olarak TM veya TE olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 7.7 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu

TE modunda çalışan dikdörtgen dalga kılavuzlarını yükleyerek, koaksiyel tutucularla yapıldığı gibi mikrodalga frekanslarında araya girme kaybı ölçümleri gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Ölçüm örneğinin kılavuza uyması için kesilmesi gerekmektedir. Ancak birçok yöntemde de benzer durumlar ortaya çıkmaktadır. Geniş frekans kapsamı elde etmek için çeşitli boyutlarda dalga kılavuzları kullanılabilir. Şekil 7.8’de 5 farklı dalga kılavuzu için hazırlanan örnekler gösterilmektedir. Bu yaklaşımın bir avantajı, iletim hattında kısa devre oluşturulmadığı için temas empedansı problemi oluşturulmamaktadır. Bunun yerine, araya girme kaybı ölçümü bir mikrodalga devre problemi olarak ele alınmakta ve örneğin iletim hattı üzerinde bulunmasından dolayı saçılma matrisi ölçülmektedir. Bu yöntemin diğer yöntemlerden farkı ise standart elektromanyetik ekranlama testlerinin (yüksek empedans, düşük empedans veya düzlem dalga) hiçbirine karşılık gelmemesidir. TE_{10} modu, iki manyetik ve bir elektrik alan bileşeninden oluşmaktadır. Bu bileşenler ayrıştırılamadığından yakın alan araya girme kaybı ölçümü mümkün olmamaktadır. Dalga empedansı, bir düzlem dalga veya TEM modunun aksine frekansın bir fonksiyonu şeklinde ifade edilebilmektedir. Dolayısıyla dikdörtgen dalga kılavuzu metoduyla elde edilen ölçümler, doğrudan boş alan ekranlama simülasyonu ile bağlantılı olmamaktadır (Wilson ve Ma 1988).



Şekil 7.8 Dalga kılavuzları için Hazırlanmış Örnek Seti (soldan: WR284, WR187, WR137, WR90 ve WR62) (Moučka 2019)

Yöntemde bir ağ analizörü ve dalga kılavuzu kullanılmaktadır. Ölçülmek istenilen malzeme, dalga kılavuzları arasına yerleştirilerek ölçüm alınmaktadır. Kullanılan dalga kılavuzları genellikle dikdörtgen kesit alanına sahip olmaktadır. Dalga kılavuzu metodu geniş bant ve yüksek hassasiyete sahip bir yöntemdir. Ancak malzemenin dalga kılavuzu kesit alanına göre şekillendirilmesi gerekmektedir.

Düzlem dalga ekranlama etkinliği elde etmek için dikkat edilmesi gereken 3 önemli konu bulunmaktadır. Bunlardan ilki dalga kılavuzu içindeki düzlem dalga örüntüsü ve serbest uzaydaki düzlem dalga örüntüsü birbiri ile aynı formda olmamasıdır. Gerçek düzlem dalga sonuçlarını elde etmek için ölçüm sonucundan elde edilen S-parametrelerini işlemek gerekmektedir (Moučka 2019). Referans empedans olarak dalga kılavuzu empedansı yerine serbest uzay empedansı kullanılarak S-parametreleri normalize edilebilmektedir. Fakat bazı frekans aralıklarında süresizlik oluşacağı dikkate alınmalıdır. Ayrıca malzemelerin elektrik ve manyetik geçirgenlik (permittivity and permeability) değerlerinin çıkarılması ve düzlem dalga ekranlama etkinliğinin analitik olarak hesaplanması da kullanılan bir başka yöntem olarak öne çıkmaktadır. Burada

ölçülen malzemelerin yön bağımsız (*isotropic*) özellikte olduğu varsayılmaktadır. İkinci parametre ise ölçüm hattı saçılmaya ya da dikey olmayan düzlem dalga oluşumuna sebep olabilmektedir. Son olarak da yüksek seviye mod oluşmamasına dikkat edilmelidir (Badic ve Marinescu 2002).

Normalizasyon işlemi sırasında hata yapılması durumunda frekans bantları arasında yüksek farklar bulunabilmektedir. Literatürdeki bazı makalelerdeki 2.5 dB – 10 dB bantlar arası ekranlama etkinliği değişimi, hata yapıldığını belirtmektedir. Normalizasyon işlemi ile hesaplanan ekranlama etkinliği değeri hatası 5 değişkene bağlı olmaktadır (Moučka 2019). Bunlar,

Elektriksel iletkenlik

Manyetik iletkenlik

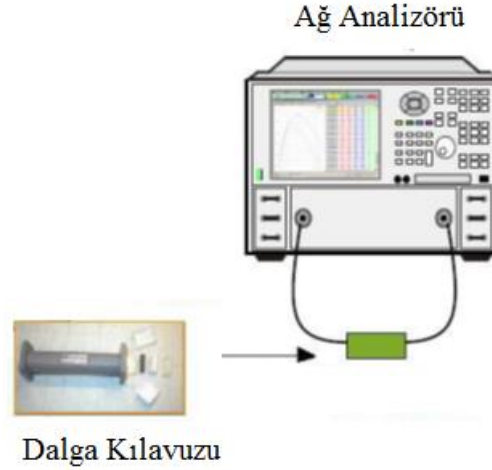
Elektriksel geçirgenlik (permittivity)

Manyetik geçirgenlik (permeability)

Örnek kalınlığı

şeklinde ifade edilmektedir.

İkinci bir yöntem ise, NRW (Nicolson–Ross–Weir) prosedürüne uygun olarak dikdörtgen dalga kılavuzları ile ölçülen kompozit malzemenin etkin elektrik ve manyetik geçirgenliğinin çıkarılmasına dayanmaktadır (Ghodgaonkar vd. 1990). Daha sonra düzlem dalga ekranlama etkinliği analitik olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 7.9 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu Metodu (Saglam 2009)

7.3 Serbest Uzay Metodu

MIL-STD 285 standardı 1956 yılında ortaya çıkmış ve uzunca bir süre ekranlı oda ve büyük yapıların ekranlama etkinliği testlerinde kullanılmıştır (Lee 1998). Sonrasında IEEE 299 standardı ekranlama etkinliği testleri için geliştirilmiştir (IEEE 299 2006). Her iki standart da ekranlama özelliklerinin belirlenmesi için araya girme kaybı ölçümünü kullanmaktadır (Graf ve Vance 1988). IEEE 299 standardı daha çok büyük boyutlu ekranlı odalar için kullanılmaktadır. Taşınabilir cihazlar içinse ASTM-1851 standardı tercih edilmektedir.

Tipik bir ekranlama etkinliği düzeneği Şekil 7.10'da ve Şekil 7.11'de gösterilmektedir. Bu yöntemde bir ağ analizörü (network analyzer) ve birbirine bakan iki anten arasına ölçüm örneği yerleştirilmektedir. Elektromanyetik enerji antenler kullanılarak örnek merkezine odaklanmaktadır. Örnek yokken elde edilen seviye (P_{ref}) ve örneğin bulunduğu durumda elde edilen elektrik alan seviyeleri (P_{sample}) birbirinden çıkarılarak ekranlama etkinliği elde edilmektedir. Düzlem dalga oluşumunu garanti altına almak için uzak alan koşullarının sağlanmasına dikkat edilmesi gerekmektedir.

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{ref}}{P_{sample}} \quad (7.16)$$

Tüm araya girme kaybı ölçümlerinde olduğu gibi ölçülen zayıflatma değeri, ölçüm sisteminin ve örneğin iç içe geçmiş sonuçlarını içermektedir. Bu nedenle sonuçlar değerlendirilirken farklılıklar gözetilmelidir. Özellikle elektromanyetik girişim problemlerinde kaynak ve etkilenen devre empedansları ve yapıları farklılık gösterebilmektedir. Bu durumda amaca uygun ölçüm düzeneği tasarımı önem kazanmaktadır.

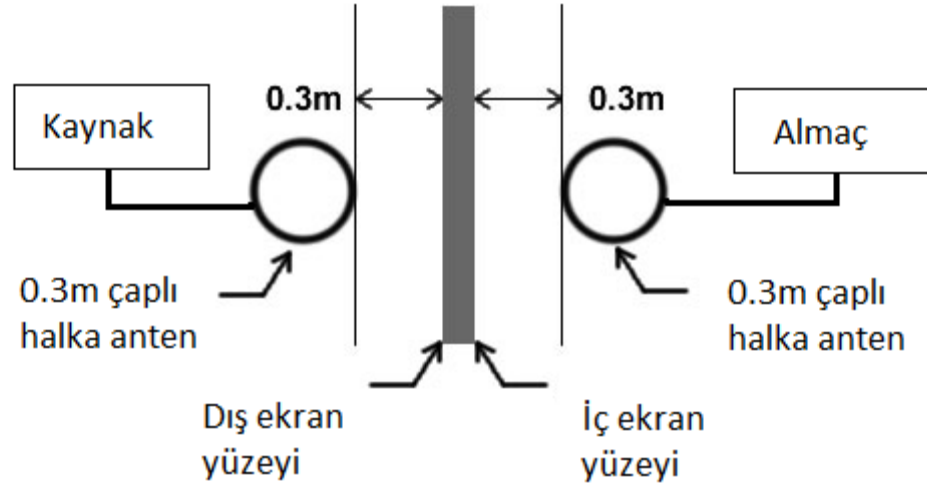
MIL-STD 285 standardı, elektromanyetik ekranlama sağlayan yapıların zayıflama özelliklerini ölçme yöntemini kapsamaktadır. Bu yapıların, 100 kilo döngü ile 10.000 mega döngü arasındaki frekans aralığındaki ekranlama etkinliği testleri için kullanılmaktadır (MIL-STD-285 1956). Üst frekans bandı sonraki revizyonlarda 400 MHz'e kadar artsa da günümüz cihazları için bu frekans bandı oldukça düşük kalmaktadır (Lee 1998).

Referans ölçümde 50 veya 72 Ω empedansa sahip bir iletim hattı ve zayıflatıcı kullanılmaktadır. Zayıflatıcı test öncesinde kalibre edilmekte ve minimum 70 dB zayıflatma değerine sahip olmaktadır. Bu sayede alıcı anten arkasında kullanılan ölçüm alıcısının (measurement receiver) zarar görmemesi amaçlanmaktadır.

IEEE 299 standardı ise ekranlı oda testlerinde kullanılmaktadır. Bu standartta 9 kHz – 18 GHz aralığında manyetik alan, elektrik alan ve düzlem dalga ekranlama etkinliği testleri için ölçüm yöntemleri tanımlanmaktadır. Fakat frekans bandı 50 Hz ve 100 GHz aralığına da artırılabilir. Ölçüm yönteminin kullanılabilmesi için oda boyutlarının 2 m'den daha büyük olması gerekmektedir (IEEE 299 2006). Fakat IEEE 299.1 standardı 0.1 – 2 m boyutlarındaki kabinler için de yöntem önermektedir. Kabin yapıları elektriksel iletkenlik sürekliliğini sağlayacak şekilde bütünleşik, modüler, tek ya da çift ekran katmanını bulunduran, farklı iletken malzemelerin kullanıldığı (alüminyum, çelik, kumaş vb.) olabilmektedir.

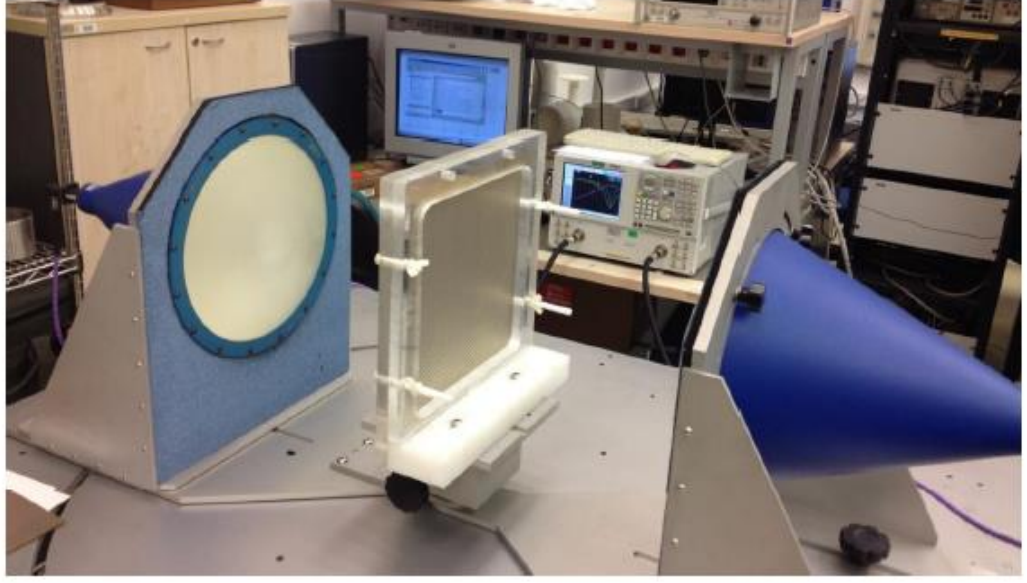
Düşük frekans ölçümlerinde elektrostatik ekranlamaya sahip halka antenler kullanılmaktadır. Anten çapı standartta 0.3 m olarak belirtilmektedir. Referans ölçüm sırasında antenler arası mesafe 0.6 m iken ölçüm alınmakta ve kaydedilmektedir.

Sonrasında antenler ekranlı oda duvarlarına 0.3 m mesafede yerleştirilerek ölçüm tekrarlanmaktadır. Aradaki fark ise manyetik alan ekranlama etkinliği olmaktadır. Ölçüm almacının ve alıcı antenin kabin içerisinde kullanılması, ortam kaynaklı hataların oluşmasını engellemektedir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta ise ölçüm almacından ölçülen seviyenin gürültü seviyesine yakın olmamasıdır. Üreteç tarafındaki 10 dB’lik artışın ölçüm almacı tarafında da 10 dB olarak ölçüldüğü doğrulanmalıdır. Elektrik alan ölçümlerinde ise antenler arası mesafe 2m olarak belirlenmektedir.



Şekil 7.10 IEEE 299 Manyetik Alan Test Düzenegi

Serbest uzay metodu en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Yön bağımlı malzemeler ve manyetik malzemeler için de karakterizasyon sağlaması nedeniyle avantajlıdır (Sierros vd. 2009). Fakat kapalı bir ortam bulunmaması nedeniyle çevresel şartlardan etkilenebilmektedir. Örnek kenarlarında meydana gelen kırınım ve antenler arası çoklu yansıma gibi durumlarda hassasiyet düşebilmektedir. Bunu engellemek için elektromanyetik dalgayı belirli bir alana odaklayan mercekler kullanılabilir. Şekil 7.11’de bu antenlerin bulunduğu test düzenegi gösterilmektedir.



Şekil 7.11 Lens Kullanımının Bulunduğu Anten Düzeneği (Dalkılıç 2014)

8. OPTİMİZASYON

Kullanılan metalik ağ yapısının genişlik ve periyot parametreleri optimizasyon algoritmasının arama parametrelerine göre değiştirilmektedir. Her bir çift için elde edilen değerler, optimizasyon problemine potansiyel bir çözüm olarak ele alınır. Bu nedenle veri çiftleri, Genetik Algoritma optimizasyonunda bir kromozom, Parçacık Sürüsü (particle swarm) optimizasyonunda bir parçacık olarak kabul edilir.

Dahası, her bir genişlik-periyot çifti için ekranlama etkinliği ve optik geçirgenlik çıktıları tüm frekans bandında hesaplanır. Bundan sonra ekranlama etkinliği değerinin tüm frekans bandında ortalaması alınır ve bu ortalama ekranlama değeri, metal ağın uygunluk değeri (kromozom veya parçacığın uygunluğu) olarak kabul edilir. Optimizasyonda tüm frekans bandının ortalaması alındığı için metal ağın her bir analiz frekansındaki etkisi göz önünde bulundurulur. Optik kapaticılık ise ağ yapısının yüzey üzerinde kapladığı alan formülü üzerinden hesaplanır.

Optimizasyonun amacı, ilgilenilen parametre aralığında optik kapaticılığın en düşük olduğu ve ekranlama etkinliği değerinin belirlenen eşik değerinin üzerinde olduğu noktayı bulmaktır. Bu bölümde çalışmada kullanılan optimizasyon algoritmalarından bahsedilecektir.

Stokastik optimizasyon algoritmaları, türevleri hesaplanamayan amaç fonksiyonları için arama prosedüründe rastgelelikten yararlanan algoritmalarlardır. Deterministik doğrudan arama yöntemlerinden farklı olarak stokastik algoritmalar amaç fonksiyonunun daha fazla örneklenmesini içermektedir. Ancak yanıltıcı yerel optima içeren problemleri çözebilmektedir. Bu algoritmalara örnek olarak Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing), Evrim Stratejisi (Evolution Strategy), Çapraz Entropi Yöntemi (Cross-Entropy Method) ve Nüfus Algoritmaları (Population Algorithms) verilebilmektedir. Popülasyon optimizasyon algoritmaları, birlikte örneklemek, keşfetmek ve bir optimuma odaklanmak için kullanılan aday çözüm havuzunu (popülasyonunu) koruyan stokastik optimizasyon algoritmalarıdır. Bu tür algoritmalar, gürültülü fonksiyon değerlendirmeleri ve birçok global optima olabilen zorlu problemler için tasarlanmaktadır. Genellikle diğer

yöntemlere yeterince iyi bir çözüm bulunamadığında tercih edilmektedir. Aday çözümler havuzu, yerel optimumları eleyerek global optimuma ulaşma ihtimalini artırmaktadır. Popülasyon optimizasyon algoritmalarına ise aşağıdaki örnekler verilebilmektedir:

- Genetik Algoritma (Genetic)
- Diferansiyel Evrim (Differential Evolution)
- Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm)

8.1 Genetik Algoritma Optimizasyonu

Genetik Algoritma (GA) genetik ve doğal seçim ilkelerine dayanan bir optimizasyon ve arama tekniği olarak tanımlanmaktadır. Bir GA, birçok bireyden oluşan bir popülasyonun, belirli seçim kuralları altında ‘uygunluğu’ maksimize eden (yani maliyet fonksiyonunu minimize eden) bir duruma evrimleşmesine izin vermektedir (Haupt ve Haupt 2004).

Genetik Algoritma stokastik ve global optimizasyon algoritmasıdır. Biyolojik evrim teorisindeki doğal seleksiyon teorisinden esinlenilmiştir. Spesifik olarak genetik anlayışını optimizasyon problemine uygulayan bir yöntemdir. Genetik Algoritmalar daha uyumlu bireylerin genlerini bir sonraki nesle aktarma olasılığının daha yüksek olduğu biyolojik evrimden ilham almaktadır. Yöntem ilk olarak John Holland tarafından 1960larda geliştirilmiştir (Holland 1975). 1989 yılında gaz boru hattı iletiminin kontrolünü de içeren zorlu bir optimizasyon problemini çözen David Goldberg ile tanınmıştır. Holland’ın özgün çalışması kitabında da özetlenmiştir (Goldberg 1989). Ayrıca şema teoremi yardımıyla GA’lar için teorik temel geliştirmeye de çalışmıştır. De Jong’un çalışmaları ise fonksiyon optimizasyonu için GA’nın kullanılabilirliğini ortaya koymuştur (DeJong 1975).

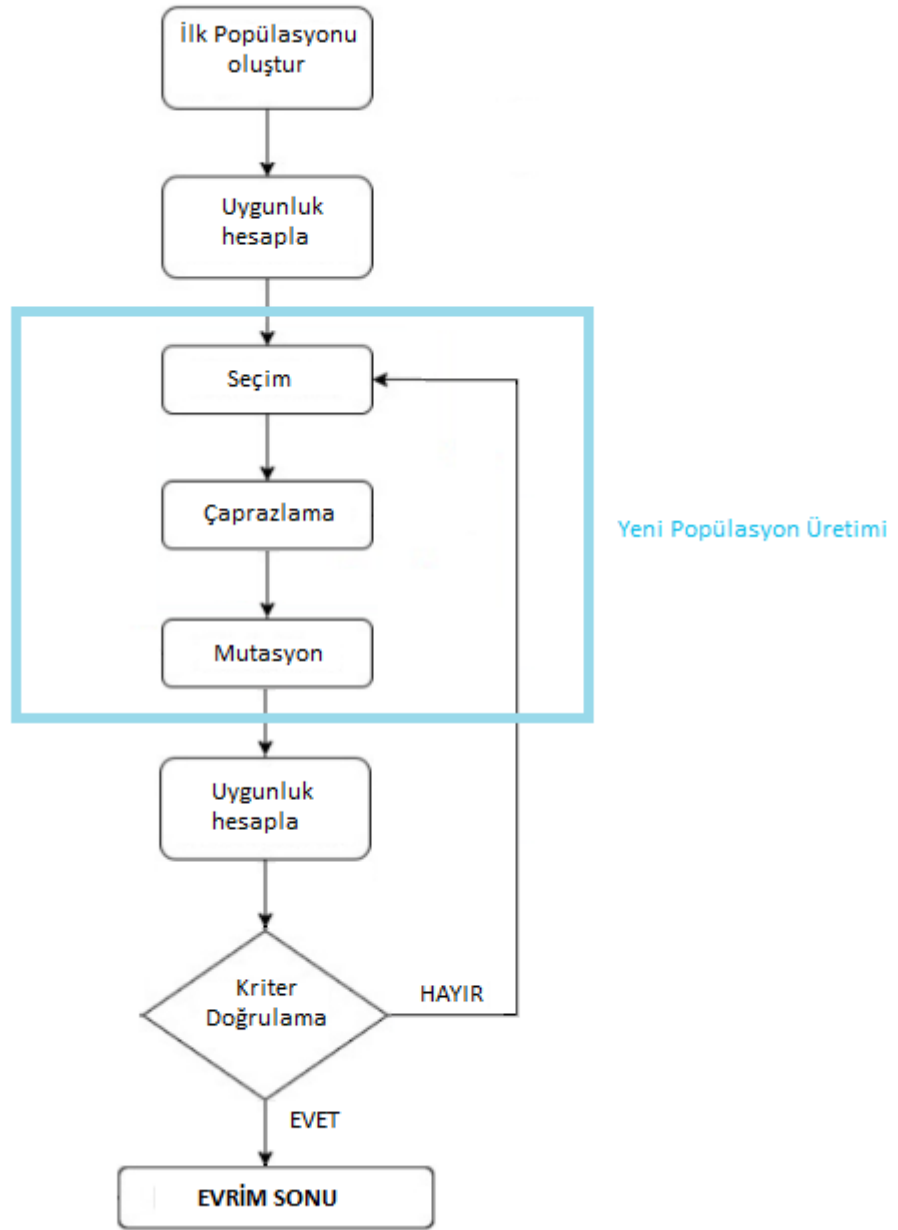
Genetik Algoritmanın bazı avantajları aşağıdaki gibidir (Haupt ve Haupt 2004):

- Sürekli veya ayrık değişkenlerle optimize edebilmektedir.
- Türev bilgisi gerektirmemektedir,
- Maliyet yüzeyinin (cost surface) geniş bir örnekleme üzerinden eşzamanlı arama yapmaktadır,

- Çok sayıda değişkenle uygulanabilmektedir,
- Paralel hesaplama yapısında da kullanılabilir,
- Yerel minimumlara takılmadan karmaşık optimizasyon problemlerini çözebilmektedir,
- Yalnızca tek bir çözüm değil, optimum değişkenler listesi sağlamaktadır,
- Değişkenleri kodlayarak optimizasyonu kodlanmış değişkenlerle yapabilmektedir,

Genetik Algoritma özellikle klasik optimizasyon yaklaşımları başarısız olduğunda çarpıcı sonuçlar verebilmektedir. Amaç fonksiyonunun hesaplanamadığı ve çok değişkenli optimizasyon problemleri Genetik Algoritma için en uygun problemler olmaktadır. Fakat türevlenebilir bir amaç fonksiyonu olduğunda klasik algoritmalarından çok daha yavaş sonuca ulaşacağı unutulmamalıdır.

Algoritma bir genetik temsilin uygunluk (fonksiyon değerlendirmeleri), genetik rekombinasyon (periyot ve genişlik değerlerinin çaprazlanması) ve mutasyonun (periyot ve genişlik değerlerinin değiştirilmesi) benzetimlerini kullanmaktadır. Algoritma öncelikle bir popölasyon oluşturmaya çalışmaktadır. Ana döngü sabit sayıda yenileme için veya belirli bir yenileme sayısı boyunca en iyi çözümde daha fazla gelişme görölmejene kadar tekrarlanmaktadır. Algoritmanın her bir yinelemesi (iteration) evrimsel bir nesil gibidir. Sonrasında aday özümmler amaç fonksiyonuna göre değerlendirilmektedir. Her aday çözüm için amaç fonksiyonu değerlendirmesi, çözümün uygunluğu olarak ele alınmaktadır. Daha sonra uygunluk durumuna göre ebeveynler seçilmektedir. Belirli bir aday çözüm, ebeveyn olarak sıfır veya daha fazla kez kullanılabilir. Seçime yönelik basit ve etkili bir yaklaşım, popölasyondan rastgele k aday çekmeyi ve gruptan en uygun adayı seçmeyi içermektedir. Buna k 'nin bir hiperparametre olarak ayarlandığı turnuva seçimi (tournament selection) denmektedir. Bu basit yaklaşım uygunluk – ortantılı (fitness - proportionate) şemasını simule etmektedir. Turnuva seçiminde her ebeveyn, popölasyonun rastgele seçilmiş k kromozomundan en uygun olanıdır. Ebeveynler, yeni nesil aday noktalarının oluşturulmasında kullanılmaktadır.



Şekil 8.1 Genetik Algoritma Optimizasyon Basamakları

8.1.1 İlk popülasyonu oluşturma

GA arama uzayı içerisinde rastgele kromozomlardan oluşan (N_{pop}) bir başlangıç popülasyonu oluşturmakla başlar. Kromozom N_{opt} optimizasyon parametrelerine sahiptir ve her parametre genlere rastgele kodlanmıştır. Genler ikili kodlama sistemiyle $\{0,1\}$

seçilmektedir. Gerçek değerli x_k parametreleri ise basit lineer dönüşümlerle çözülebilmektedir (decode).

$$x_k = x_k^{min} + \frac{\sum_{j=1}^L g_j 2^{L-j}}{2^L - 1} (x_k^{max} - x_k^{min}), \quad k = 1, 2, \dots, N_{par} \quad (8.1)$$

Burada x_k^{min} ve x_k^{max} sırasıyla izin verilen minimum ve maksimum parametre değerlerini göstermektedir.

8.1.2 Uygunluk hesaplama

GA doğası gereği bir maksimize edicidir. Tanımlanan şemaların çoğu ise minimizasyon problemlerine uygulanmaktadır. Bu nedenle minimum arayışında bir uygunluk ölçeğine (fitness scaling) ihtiyaç duyulabilmektedir. Operatör doğrusal bir dönüşüm yoluyla amaç fonksiyonunun değerlerini uygunluk değerlerine ölçeklendirmektedir.

$$fitness(i) = 1/object(i), \quad i = 1, 2, \dots, N_{pop} \quad (8.2)$$

Burada N_{pop} , nüfus büyüklüğünü ifade etmektedir.

8.1.3 Seçim

Seçim operatörü en uygun olanın hayatta kalması ilkesini uygulamaktadır. Her kromozom, o kromozoma göre bir değer atanan uygunluk fonksiyonuna sahip olmaktadır. Her kromozom için uygunluk değerleri, amaç fonksiyonunda yerine koyularak hesaplanmaktadır. Problem için optimum çözümü aramak üzere popülasyon ana GA döngüsüne girilmektedir. GA operatörleri başlangıç popülasyonuna uygulanmaktadır. Böylece başlangıç popülasyonu yeni nesillere evrilmektedir. Bu operasyon yeni nesil çözüm dizileri elde etmek için Şekil 8.1’de belirtilen sırayla uygulanmaktadır. Kromozomlar uygunluk durumuna göre en iyiden en kötüye doğru sıralanmaktadır. Seçici operatör en iyi kromozomları seçerek bir eşleştirme havuzu oluşturmaktadır. Kabul edilemez kromozomlar ise elenmektedir. En yaygın olarak kullanılan seçim yöntemleri ise rulet çarkı, sıralama ve turnuva seçimi olarak belirtilmektedir. Turnuva seçiminin

diğer iki seçimden daha hızlı yakınsama sağladığı da gösterilmiştir (Goldberg ve Deb 1991). Turnuva seçiminde kromozomlar popülasyondan rastgele seçilmektedir. Bu kromozomlar uygunluk fonksiyonu çıktılarına göre karşılaştırılmaktadır. En yüksek uygunluğa sahip kromozom karşılaşmaları kazanarak ve eşleşme havuzuna yerleştirilmektedir. Daha sonra bu bireyler tekrar genel popülasyona yerleştirilmekte ve işlem tekrarlanmaktadır. Sonunda, çiftleşme havuzu genellikle popülasyon büyüklüğü ile aynı boyutta olmaktadır.

8.1.4 Çaprazlama

Seçim işlemini çaprazlama takip etmektedir. Öncelikle eşleştirme havuzundan iki ebeveyn üye seçilmektedir. Bir çift çocuk, eşleştirilmiş çiftlerin genlerinin olasılıksal çaprazlanmasına göre oluşturulmaktadır. Elenen ebeveynleri dengeleyebilmek için yeterince ebeveyn tekrar üretilmektedir. Böylece toplam kromozom sayısı her iterasyondan sonra sabit kalmaktadır. Örneğin tek nokta çaprazlama kullanıldığında rastgele bir çaprazlama noktası seçilmektedir. Kromozomun seçilen noktadan önceki kısmı *ebeveyn1*'den *çocuk1*'e ve *ebeveyn2*'den *çocuk2*'ye kopyalanmaktadır. Geri kalan kısımlar ise diğer ebeveyninden gelen kromozomlar ile tamamlanmaktadır. Çaprazlama operatörünün daha iyi bireyler üretme ihtimali 0.6 – 0.9 olarak belirtilmektedir (Weile ve Michielssen 1997).

Ebeveyn1: 00000

Ebeveyn2: 11111

Çaprazlama algoritması sonucunda oluşan çocuklar ise:

Çocuk1: 00011

Çocuk2: 11100

Çaprazlama operatörünün birçok versiyonu bulunmaktadır. Çaprazlama her ebeveyn çifti için olasılıksal olarak uygulanmaktadır. Bazı durumlarda rekombinasyon operatörü yerine ebeveynlerin kopyaları da alınabilmektedir. Çaprazlama işlemi, %80 veya %90 gibi büyük bir değere ayarlanmış bir hiperparametre tarafından kontrol edilmektedir. Çaprazlama Genetik Algoritmanın en ayırt edici özelliği olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çocuk oluşturmak için iki ebeveynin parçalarını karıştırmayı ve eşleştirmeyi içermektedir. Bu karıştırma ve eşleştirmeyi ise bireylerin temsiline göre gerçekleştirmektedir.

8.1.5 Mutasyon

Son olarak çaprazlanan kromozomları rastgele bozup bir sonraki popülasyonu oluşturmak üzere mutasyon işlemi uygulanmaktadır. Aday çocuklardaki bazı genler, P_{mut} olasılığı ile ters çevrilmektedir. $P > P_{mut}$ ise kromozomdaki bir gen rastgele seçilerek ters çevrilir. Genellikle mutasyon olasılığı P_{mut} değeri 0.001 – 0.1 olarak alınmaktadır (Weile ve Michielssen 1997). Mutasyon operatörü yerel maksimumlardan kaçmak için bir mekanizma sağlarken, erken yakınsamayı da önlemektedir.

8.1.6 Seçkinlik (Elitizm) modeli

Bazı algoritmalarda mutasyon sonrası seçkinlik modeli de uygulanmaktadır. Optimizasyonun yakınsama zorluğunu azaltmak için kullanılmaktadır. GA’da bir sonraki nesildeki en uygun bireyin, bir önceki nesildeki tüm bireylerden daha düşük uygunluğa sahip olması mümkündür (Luo 2006). Seçkinlik fonksiyonu yeni nesildeki en kötü bireyi, önceki nesildeki en iyi bireyle değiştirmektedir. Seçim, çaprazlama, mutasyon işlemlerinin yinelemeli (iterative) uygulaması, geliştirilmiş ortalama uygunluğa sahip yeni popülasyonlara yol açmaktadır. Durdurma kriterinin uygulanması ise büyük ölçüde istenen optimum çözüme bağlı olmaktadır. Muhtemel sonlandırma koşulları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- 1- Belirli sayıda neslin tamamlanmış olması
- 2- En iyi çözümün amaç fonksiyonunda kabul edilebilir seviyeye ulaşması
- 3- Birkaç nesil boyunca uygunluk fonksiyonundaki ihmal edilebilir değişim
- 4- Yukarıdaki koşulların kombinasyonu

8.2 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) biyolojiden ilham alan algoritmalarından birisidir. Yapılan araştırmalar, belirli bir gruba ait bazı hayvanların (kuşlar, balıklar vb.), grupları arasında bilgi paylaşabildiklerini ve bu yeteneklerin bu hayvanlara büyük bir hayatta kalma avantajı sağladığını göstermektedir. Bu araştırmalardan ilham alan Kennedy ve Eberhart, 1995 yılında doğrusal olmayan sürekli fonksiyonları optimize etmek için uygun bir metasezgisel algoritma olan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) algoritmasını (Kennedy ve Eberhart 1995) önermiştir.

Diğer optimizasyon algoritmalarından farkı sadece amaç fonksiyonu gerekmesi ve amaç fonksiyonunun gradyanına (gradient) veya herhangi bir diferansiyel formuna bağlı olmamasıdır. Ayrıca çok az hiperparametreye sahip olmaktadır. PSO algoritması hızlı yakınsaması, az ve öz formüllere sahip olması sebebiyle araştırmacıların dikkatini çekmektedir. PSO algoritmasının temel fikri, aday çözümlerden (parçacıklar) oluşan bir popülasyona (sürü) sahip olmaktır. Bu parçacıklar arama uzayında birkaç basit formüle göre hareket etmektedirler. Parçacıkların hareketleri, arama uzayındaki en iyi bilinen konumları ve tüm sürünün en iyi bilinen konumu tarafından yönlendirilmektedir. İyileştirilmiş pozisyonlar keşfedildiğinde, bunlar tüm sürünün hareketlerine rehberlik etmektedir. İşlemler bu şekilde tekrarlanarak çözüme ulaşmak amaçlanmaktadır. Genetik Algoritmada da olduğu gibi optimum sonuca ulaşma garantisi bulunmamaktadır (Zhang vd. 2012).

PSO'nun karmaşık matematiksel problemleri çözmek için bir optimizasyon algoritmasının formülasyonuna nasıl ilham verdiğini açıklamak için, bir sürünün davranışının incelenmesi gerekmektedir. Bir bölgenin üzerinde uçan bir kuş sürüsü, karaya çıkmak için bir nokta bulmalıdır. Bu durumda, tüm sürünün hangi noktaya inmesi gerektiğinin tanımı karmaşık bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Optimum noktanın belirlenebilmesi için gıda mevcudiyetini en üst düzeye çıkarılmalı ve yırtıcıların bulunma riski en aza indirilmedir. Bu bağlamda kuşların hareketi bir koreografi olarak değerlendirilebilmektedir. Kuşlar, konacak en iyi yer belirlenene ve tüm sürü aynı anda inene kadar bir süre eşzamanlı olarak hareket etmektedir (Almeida ve Leite 2019).

Yukarıdaki örnekte, sürünün hareketi ancak tüm sürü üyeleri kendi aralarında bilgi paylaşabildiğinde bütün halinde hareket edilebilmektedir. Aksi takdirde, her üyenin farklı bir noktaya ve farklı bir zamanda iniş yapmasıyla sonuçlanacaktı. 1990'ların başlarından itibaren hayvanların sosyal davranışlarıyla ilgili yapılan araştırmalar, karaya çıkmak için iyi bir nokta arayan bir sürünün tüm kuşlarının, sürü üyelerinden biri tarafından daha iyi bir nokta bulunana kadar bir önceki en iyi noktayı bildiklerini işaret etmektedir. Diğer bir ifadeyle sürüde bireysel ve toplumsal bilgi olarak iki bilgi türü bulunmaktadır. Her birey toplumsal bilgiyi güncelleyerek dengelemektedir. Bu durumda bir noktanın iyi olup olmadığı hayatta kalma koşulları ve yiyecek miktarı gözetilerek sürü tarafından değerlendirilmektedir.

Tanımlanan iniş için en iyi noktayı bulma problemi bir optimizasyon problemi oluşturmaktadır. Sürü, üyelerinin hayatta kalma koşullarını en üst düzeye çıkarmak için uzayda en iyi noktanın belirlenmesi gerekmektedir. Bunu yapmak için, her kuş aynı anda birkaç hayatta kalma kriterini kullanarak farklı noktaları araştırmakta ve değerlendirmektedir. Optimum nokta değerlendirmesi tüm sürü tarafından yapılmaktadır.

Kennedy ve Eberhart, karaya güvenli bir nokta bulma problemini çözerken onlara hayatta kalma konusunda büyük avantajlar sağlayan kuşların sosyal davranışlarından esinlenerek, bu davranışı taklit edebilecek PSO adlı bir algoritma önermiştir. Algoritmanın klasik versiyonu olarak da bilinen atalet versiyonu 1995 yılında önerilmiştir (Kennedy ve Eberhart 1995). Günümüze kadar klasik versiyonun farklı türevleri de ortaya konmuştur. Bunlar şu şekilde sıralanabilmektedir:

Lineer azalan atalet ağırlığı (Shi ve Eberhart 1999),

Daralma faktörü ağırlığı (Eberhart ve Shi 2000),

Dinamik atalet ve maksimum hız azalması (Coelho ve Mariani 2006),

Hibrit modeller (Han ve Kim 2002)

Kuantumdan yaklaşım tekniklerinin benzetimi (Colaço vd. 2006).

1995 yılında önerildiğinden bu yana Parçacık Sürüsü Optimizasyonu antenler gibi elektromanyetik yapıların tasarımı ve optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. 2006 yılında tarafından ise frekans seçici yüzeylerin optimizasyonunda da kullanılmıştır (Genovesi vd. 2006). Bu makalede Genetik Algoritmaya kıyasla daha az aday çözüm ve daha az iterasyon sayısı ile yakınsamaya eğilimli olduğu belirtilmiştir.

8.2.1 Sosyal davranışların simülasyonu

Kuş sürüsü ya da balık popülasyonundaki bireylerin hareketi, bilgisayar simülasyonlarında kullanılmaktaydı. Özellikle, Reynolds (Kennedy ve Eberhart 1995) ve Heppner, Grenander (Haupt ve Haupt 2004) kuş sürüsü davranışlarını simülasyonlara uyarlamıştır. Bir zoolog olan Heppner, çok sayıda kuşun eşzamanlı olarak kümelenmesini, genellikle aniden yön değiştirmesini, saçılma ve yeniden gruplaşmayı vb. sağlayan temel kuralları keşfetmekle ilgilenmekteydi. Hem Reynolds hem de Heppner yerel süreçlerin, kuşların sosyal davranışının öngörülemez grup dinamiklerinin altında yatabileceğini düşünüyordu. Her iki model de büyük ölçüde bireyler arası mesafelerin manipülasyonuna dayanıyordu. Diğer bir ifadeyle sürü davranışının eşzamanlılığının, kuşların kendileri ve komşuları arasında optimum bir mesafeyi koruma çabalarının sonucu olduğunu varsaymaktadır (Kennedy ve Eberhart 1995).

İnsanlar da dahil olmak sürüler ve toplulukların, üzere hayvanların sosyal davranışlarının altında bazı aynı kuralların yattığını varsaymak uzun zamandır kullanılan bir yöntemdir. Sosyobiolog E. O. Wilson'ın (Zhang vd. 2012) balık yetiştirme konusundaki görüşlerini şu şekilde belirtmiştir: ‘En azından teoride, topluluğun bireysel üyeleri, yiyecek arayışı sırasında topluluğun diğer tüm üyelerinin keşiflerinden ve önceki deneyimlerinden yararlanabilir. Bu avantaj, kaynaklar kümeler halinde dağınık olduğunda belirleyici hale gelebilir’. Hatta bu durum yiyecek kaynakları için rekabeti de azaltmaktadır. Bu ifadeyle topluluklar arasındaki sosyal bilgi paylaşımının evrimsel bir avantaj sağladığını öne sürmektedir. Bu hipotez, Parçacık Sürüsü optimizasyonunun temelini oluşturmaktadır.

Bir optimizasyon probleminin amacı, $f(X)$ fonksiyonunun önerilen optimizasyon yöntemine göre minimize veya maksimize eden bir $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ ... \ x_n]$ vektörü ile

temsil edilen bir değişkeni belirlemektir. Değişken vektör X , konum vektörü olarak ifade edilmektedir. Bu vektör n boyutlu bir değişken modeli temsil etmektedir. Burada n bir problemdeki değişken sayısına karşılık gelmektedir. Öte yandan, $f(X)$ fonksiyonuna uygunluk ya da amaç fonksiyonu denmektedir. Uygunluk fonksiyonu sayesinde, bir X konumunun ne kadar iyi veya kötü olduğu değerlendirilebilmektedir.

P parçacıklı bir sürü düşünüldüğünde, onu oluşturan i parçacığının her biri için bir t iterasyonda $X_i^t = (x_{i1} x_{i2} x_{i3} \dots x_{in})^T$ konum vektörü ve $V_i^t = (v_{i1} v_{i2} v_{i3} \dots v_{in})^T$ hız vektörü vardır. Bu vektörler, j boyutu aracılığıyla aşağıdaki denklemlere göre güncellenmektedir:

$$V_{ij}^{t+1} = wV_{ij}^t + c_1r_1^t(pbest_{ij} - X_{ij}^t) + c_2r_2^t(gbest_j - X_{ij}^t) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8.3)$$

$$X_{ij}^{t+1} = X_{ij}^t + V_{ij}^{t+1} \quad i = 1, 2, \dots, P \quad (8.4)$$

Burada ilk denklem, bir iterasyonda bir parçacığın hareketine üç farklı katkı olduğunu belirtmektedir. Dolayısıyla incelenmesi gereken üç terim bulunmaktadır. İkinci denklemde ise parçacığın konumları güncellenmektedir. w parametresi atalet ağırlığı sabitidir. Klasik PSO versiyonu için pozitif bir değer olarak belirlenmektedir. Bu parametre global arama ve yerel aramayı dengelemek için önemli olmaktadır. Bu parametre açısından, PSO'nun klasik versiyonu ile ondan türetilen diğer versiyonlar arasındaki yaklaşım farklılıkları bulunmaktadır.

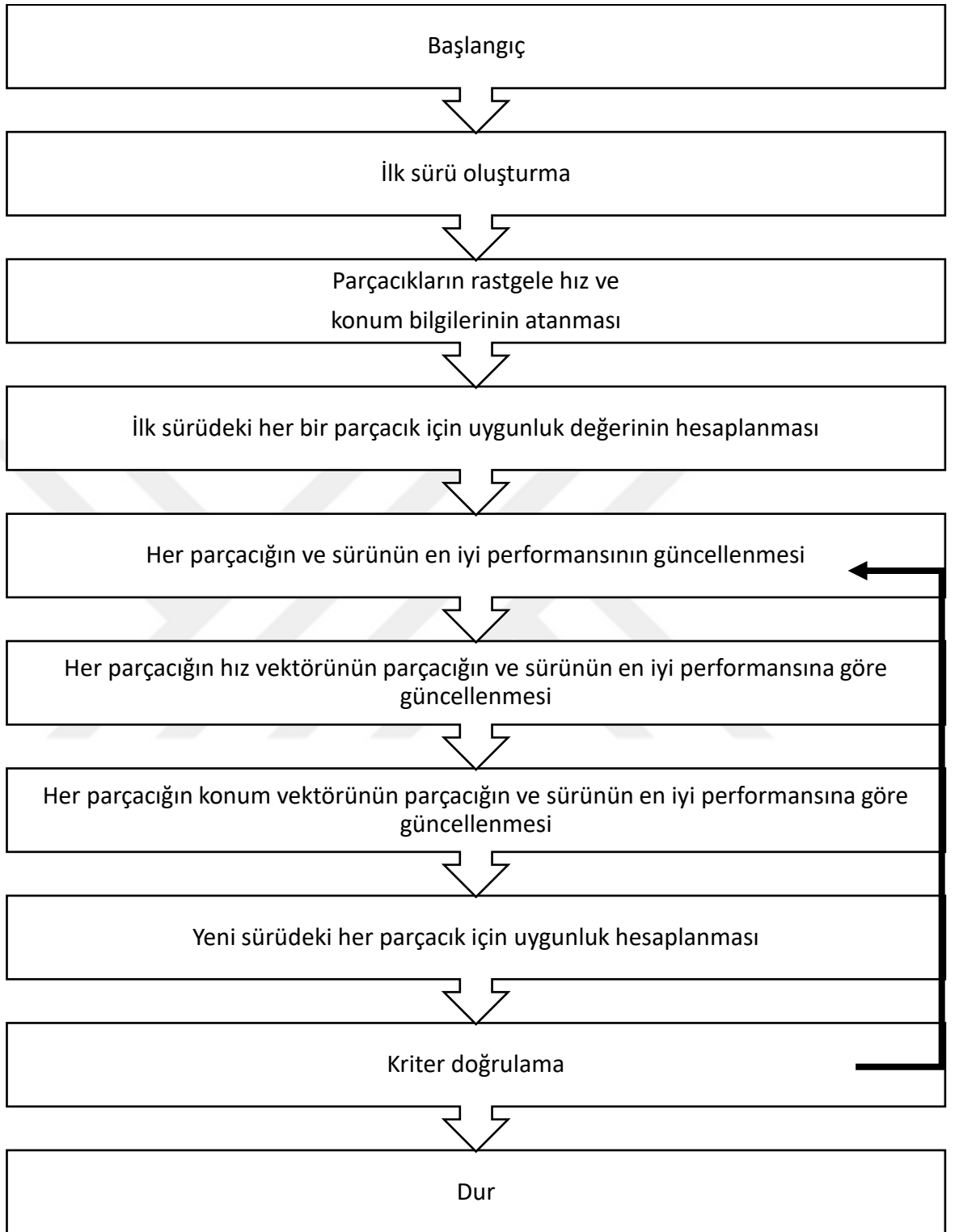
Hız güncelleme denkleminin ilk terimi, w parametresi ile parçacığın önceki hızının çarpımı olmaktadır. Diğer bir ifadeyle parçacığın önceki hızının, mevcut hızı üzerindeki etkisi w ile ifade edilmektedir. Örneğin, $w = 1$ ise, parçacığın hareketi önceki hareketinden tamamen etkilenmektedir. Dolayısıyla parçacık aynı yönde ilerlemeye devam edebilmektedir. Öte yandan, eğer $0 \leq w < 1$ ise, bu etki azalmaktadır. Bu da parçacığın arama uzayındaki diğer bölgelere gitmesi imkân tanımaktadır. Bu nedenle, atalet ağırlığı parametresi azaldıkça, sürü arama uzayında daha fazla alanı keşfedebilmektedir. Bu durumda global bir optimum bulma şansı artmaktadır. Daha

düşük w değerleri yerel optimuma daha hızlı ulaşabilmektedir. Fakat düşük değerler da simülasyon zamanını artırabilmektedir (Eberhart ve Shi 2000).

Hız güncelleme denklemindeki ikinci terim ise bireysel biliş terimi olarak adlandırılmaktadır. Parçacığın kendi en iyi konumu ($pbest_{ij}$) ve mevcut konumu (X_{ij}^t) arasındaki fark aracılığıyla hesaplanmaktadır. Parçacık $pbest_{ij}$ konumundan uzaklaştıkça fark ($pbest_{ij} - X_{ij}^t$) artmakta ve dolayısıyla parçacığı kendi en iyi konumuna çekmektedir. Bu terimde bir çarpım olarak var olan $c1$ parametresi bireysel-biliş parametresi olarak tanımlanmaktadır. Bu parametre pozitif bir sabittir ve önceki deneyimlerinin önemini ifade etmektedir. Çarpımdaki son parametre olan r_1 ise $[0,1]$ aralığında rastgele bir değer almaktadır. Bu parametre, erken yakınsamalardan kaçınarak global optimumu bulma olasılığını arttırmak için kullanılmaktadır (Eberhart ve Shi 2000).

Hız güncelleme denklemindeki üçüncü terim ise sosyal öğrenme olarak tanımlanmaktadır. Sürüdeki tüm parçacıklar, hangi parçacığın bulunduğu bakılmaksızın, elde edilen en iyi noktanın ($gbest_j$) bilgisini paylaşabilmektedir. Biçimi tıpkı ikinci terim gibi, bireysel öğrenmeyle ilişkin olmaktadır. Bu terim sayesinde optimum nokta bulunana parçacıklar için en iyi noktaya bir çekilmektedir. Bireysel biliş parametresinde olduğu gibi c_2 bir sosyal öğrenme parametresidir ve sürünün küresel öğrenmesinin önemini ağırlıklandırmaktadır.

Şekil 8.2’de ise PSO algoritması akış şemasını göstermektedir.



Şekil 8.2 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması

9. SONUÇLAR

Araştırmaya ilk olarak metalik ağ yapıların eşdeğer devre analizleri incelenerek başlanmıştır. Eşdeğer devre analizlerinde metalik ağ yapılarının iletim ve yansıma özellikleri dik gelen elektromanyetik dalga için birinci derece denklemlerle ifade edilebilmektedir. Basit ağ yapıları için elektromanyetik simülasyon programlarına ihtiyaç duyulmadan sonuçlara ulaşılabilmektedir. Bu çalışmanın faydalarından bir tanesi de frekans seçici yüzeylerin çalışma prensiplerine dair fiziksel öngörü sağlamasıdır. Böylece teorik altyapı oluşturularak ilerleme sağlanmış olmaktadır. Araştırmalara en yaygın kullanım olan ızgara yapısı ile başlanmıştır. Izgara yapısı gerek üretim kolaylığı gerekse analiz kolaylığı sebebiyle çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. Elde edilecek verileri benzer çalışmalarla birlikte değerlendirebilmek amacıyla bu yapı tercih edilmiştir.

Eşdeğer devre analizlerinde empedansın reel kısmı için Liu tarafından önerilen eşitlik kullanılmıştır (Liu ve Tan 2013). Bu eşitliğin tercih edilme sebebi deri kalınlığını hesaba katarak frekansa bağlı bir direnç modeli ortaya koymasıdır. Bu sayede yüksek frekanslarda ölçümlere daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

$$R_{mesh} = \frac{1}{\sigma\delta(1 - e^{-t/\delta})} \frac{g}{2a} \quad (9.1)$$

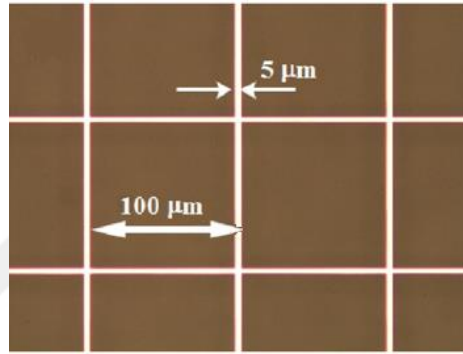
Empedansın sanal kısmı içinse Ulrich (Ulrich 1967) tarafından ortaya konulan sanal eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Bu yapının genel hatları ilk olarak Ulrich tarafından ortaya konulduğundan eşdeğer devre analizleri bundan sonraki aşamada Ulrich Metodu olarak adlandırılmıştır.

$$X_{mesh} = Z_0 \frac{-g}{\lambda} \left[\ln \left(\sin \frac{\pi a}{g} \right) \right] \quad (9.2)$$

Üretilen metalik ağ yapıları 100 – 200 nm kalınlıklarında olduğundan deri kalınlığı sebebiyle meydana gelebilecek Soğurma Kaybı ihmal edilebilmektedir. Bu durumda aşağıdaki formül yardımıyla ekranlama etkinliği hesap edilebilmektedir (Liu ve Tan 2013).

$$SE (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{R_{mesh} + iX_{mesh}}{Z_0 + R_{mesh} + iX_{mesh}} \right) \quad (9.3)$$

Şekil 9.1'deki ızgara yapısı hat kalınlığı 5 µm, ızgara periyodu ise 100 µm olan bir yapı örnek olarak gösterilmektedir. İlerleyen paragraflarda metal ağ yapıları hat genişliği/periyot şeklinde ifade edilecektir. Periyot olarak birbirini tekrarlayan en küçük yapı kullanacaktır.



Şekil 9.1 Örnek Izgara Yapısı

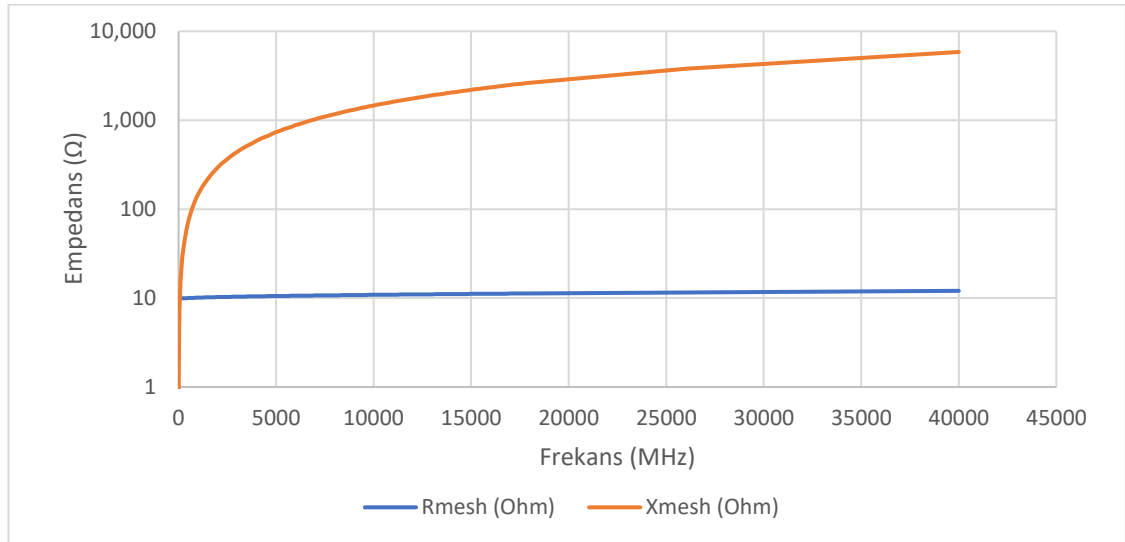
Geniş bir veri setini analiz etmek amacıyla 5 µm hat genişliğinden 400 µm hat genişliğine kadar ızgara yapıları analiz edilmeye çalışılmıştır. Yapıların detayları Çizelge 9.1'de belirtilmiştir. Hat genişlikleri üretim teknikleri göz önünde bulundurularak tercih edilmiştir. 100 µm değeri Kalın Baskı Film (Screen Printing) tekniğiyle elde edilebilecek en düşük hat genişliğidir. Daha düşük değerler için yöntem değişikliği zorunlu hâle gelmektedir. 5 µm ise büyük boyutlu yapılarda litografi ile elde edilebilecek optimum değer olarak öne çıkmaktadır. Ölçümlerde 1" ve 3" boyutlarında örnekler kullanıldığı için daha düşük değerler elde edilebilse de boyut büyüdüğünde, seri üretim şartları düşünüldüğünde ve fire verilen malzemeler dikkate alındığında 5 µm değeri optimum nokta olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 9.1 Metalik Ağ Yapıları Detayları

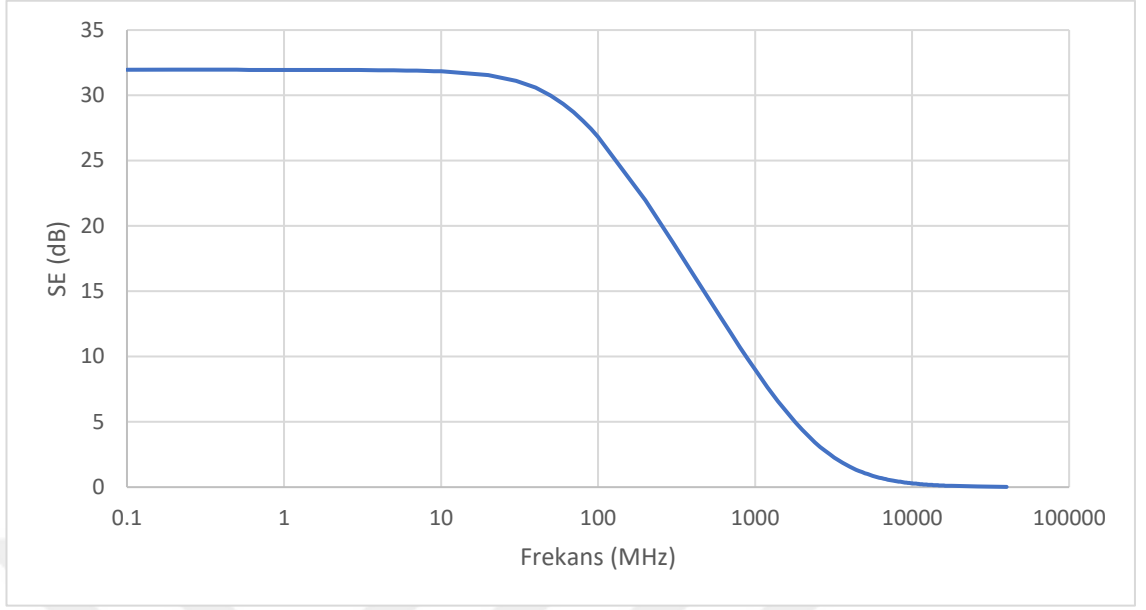
Hat Genişliği (μm)	Periyot (μm)
400	16000
100	4000
100	2000
5	100

400 μm değeri ise lazer gibi kırınım performansının önemli olduğu uygulamalarda faydalı olmaktadır. Optik yol üzerinde mümkün olduğunca az sayıda metalik ağ yapısı bulunması, lazer spot yayılımını olumlu anlamda etkilemektedir.

Şekil 9.2’de 400 μm /16000 μm ızgarasına ait direnç ve reaktans değerleri gösterilmektedir. 70 MHz’e kadar reaktans dirençten daha düşükken, sonrasında baskın hale gelmektedir. Reaktansın artmasıyla empedans artmakta ve ekranlama etkinliği değeri en yüksek değerinden düşmeye başlamaktadır. Yaklaşık 10 GHz’ten sonra da ekranlama etkinliğinden bahsedilememektedir. Bu örnekte %5 optik kapaticılığa rağmen 100 MHz sonrasında ekranlama etkinliği azalmakta ve 10 GHz sonrasında herhangi bir ekranlama etkinliğinden bahsedilememektedir.

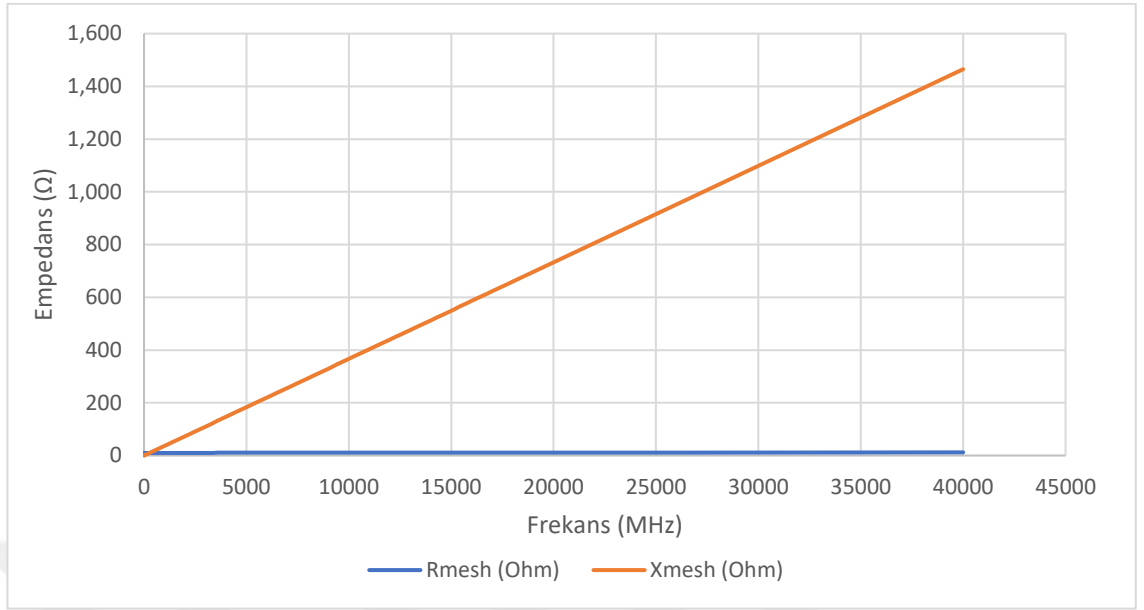


Şekil 9.2 400 μm /16000 μm Izgara Yapısı Direnç ve Reaktans Sonuçları

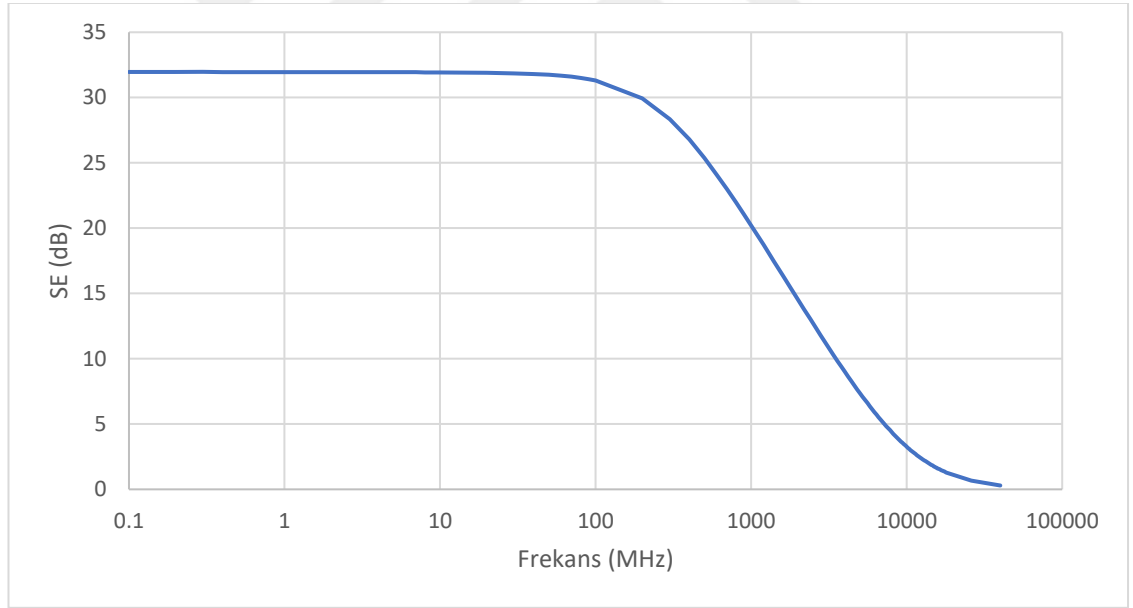


Şekil 9.3 400 μm /16000 μm Izgara Yapısı için Ekranlama Etkinliği Sonuçları

Optik kapaticılık değeri %5 olan 100 μm /4000 μm örneğine ait empedans ve ekranlama etkinliği sonuçları ise Şekil 9.4'te ve Şekil 9.5'te gösterilmektedir. 40 GHz'te 400 μm /16000 μm örneğine ait reaktans değeri yaklaşık olarak 6000 Ω 'ken, 100 μm /4000 μm örneği için en yüksek reaktans değeri 1500 Ω olarak hesaplanmaktadır. Reaktans – empedans grafiğindeki bu eğim, yüksek frekanslardaki ekranlama etkinliğini olumlu yönde etkilemektedir. 400 μm /16000 μm örneği için 1 GHz'te 9 dB ekranlama etkinliği elde edilirken, bu değer 100 μm /4000 μm ızgarası için 20 dB olmaktadır. Aynı optik kapaticılığa, dolayısıyla aynı yüzey direncine sahip iki örneğin 100 kHz bölgesindeki ekranlama etkinliği değeri ise beklenildiği üzere aynı olmaktadır.



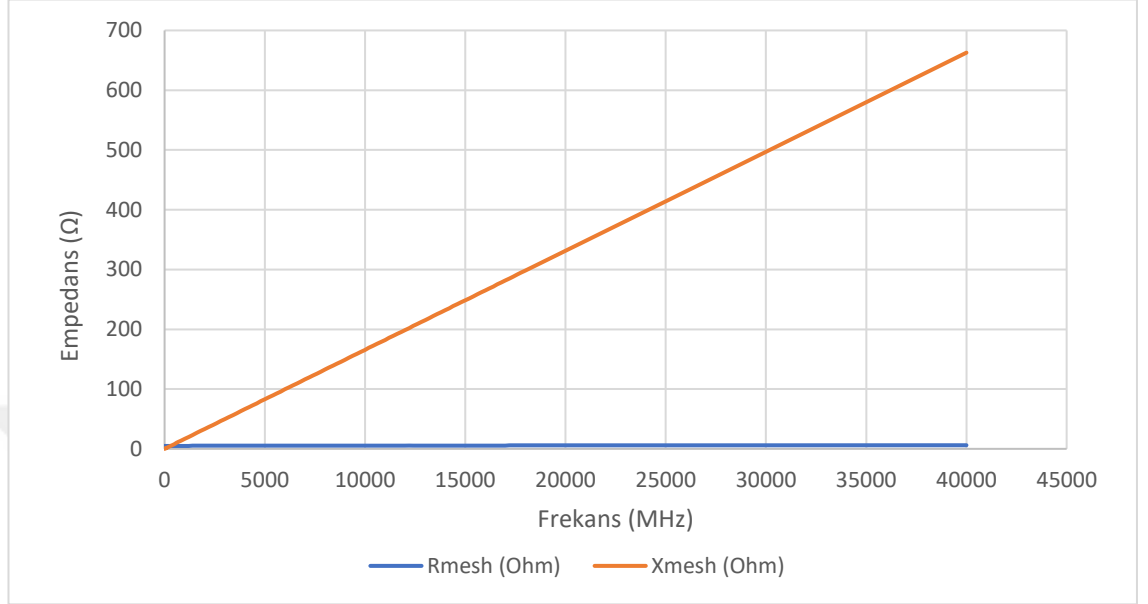
Şekil 9.4 100 μm /4000 μm Izgara Yapısı Direnç ve Reaktans Sonuçları



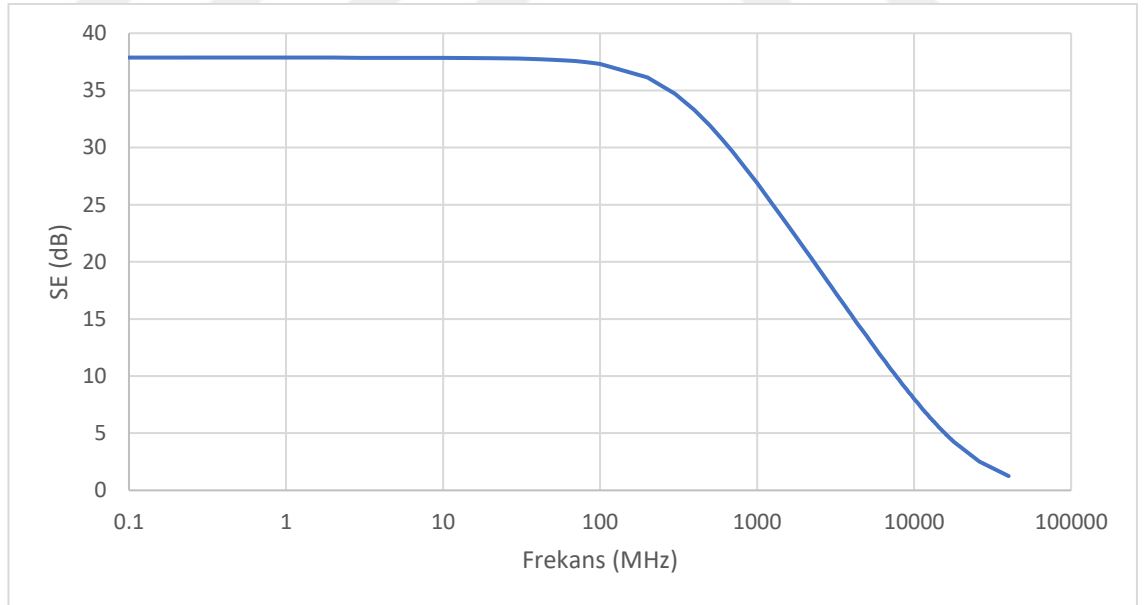
Şekil 9.5 100 μm /4000 μm Izgara Yapısı için Ekranlama Etkinliği Sonuçları

100 μm /2000 μm örneği ise %10 optik kapatıcılığa sahiptir. Dolayısıyla hem daha düşük yüzey direncine hem de 100 μm hat genişliğinden dolayı daha düşük reaktans değerine sahip olmaktadır. Şekil 9.6'da ve Şekil 9.7'de bu örneği ait empedans ve ekranlama

etkinliği değerleri incelendiğinde, daha önceki iki örnekten de daha yüksek ekranlama etkinliğine sahip olduğu gözlenmektedir.



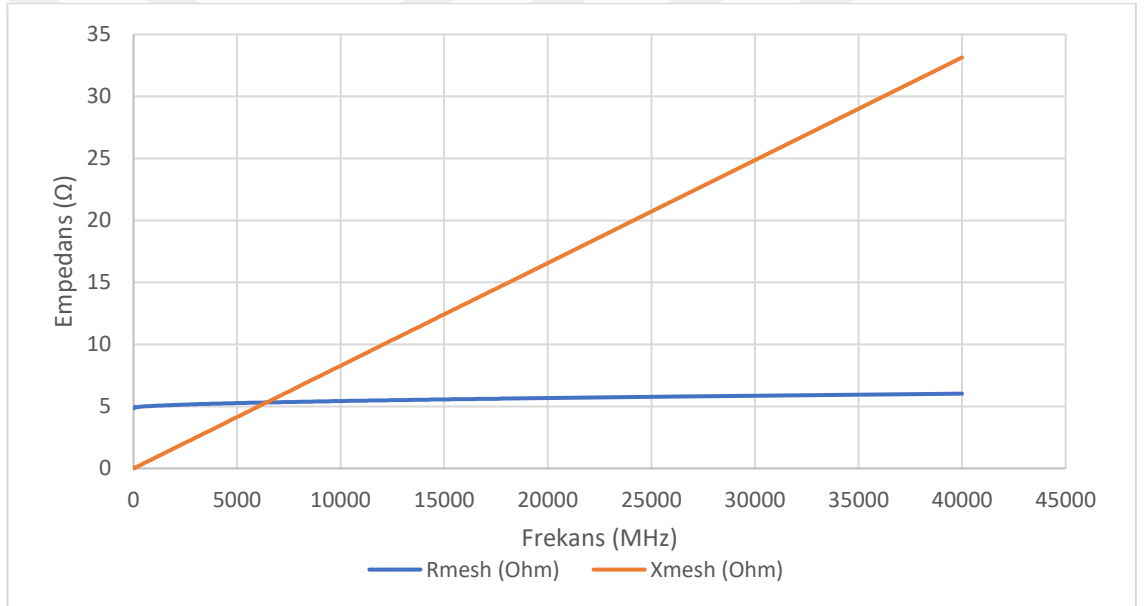
Şekil 9.6 100 µm/2000 µm Izgara Yapısı Direnç ve Reaktans Sonuçları



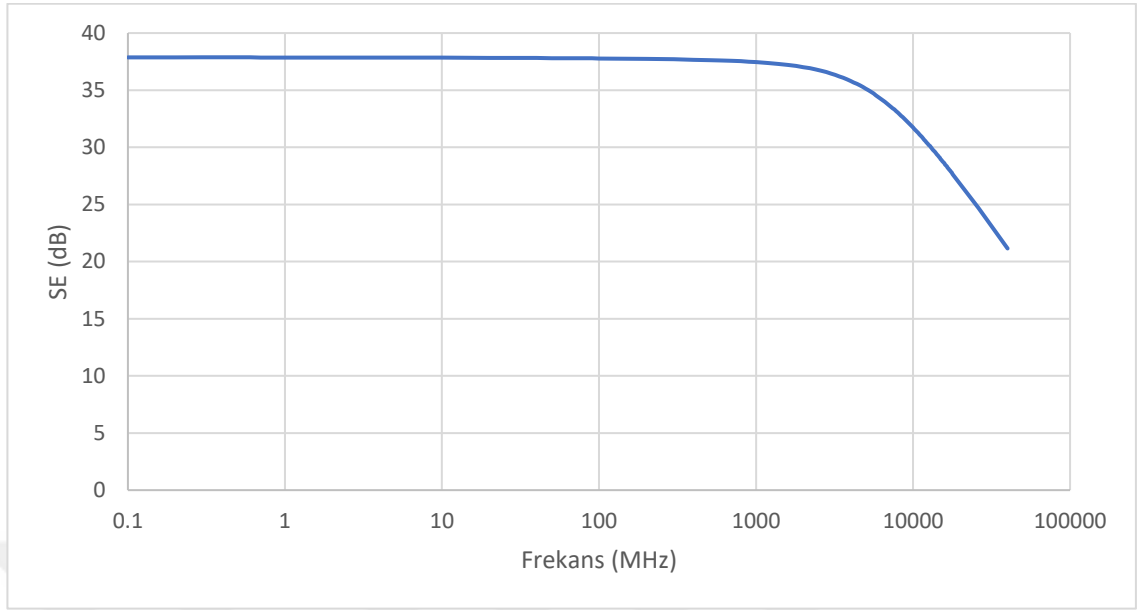
Şekil 9.7 100 µm/2000 µm Izgara Yapısı için Ekranlama Etkinliği Sonuçları

5 µm/100 µm ızgarası ise bu çalışmada en düşük hat genişliğine sahip ızgaradır. Optik kapatıcılık değerleri 100 µm/2000 µm ızgarası ile aynı olduğundan 100 kHz komşuluğunda aynı ekranlama etkinliğine sahip olmaktadır. Fakat Şekil 9.6 ve Şekil 9.8

incelendiğinde 40 GHz’te 100 μm /2000 μm için 660 Ω , 5 μm /100 μm içinse 33 Ω reaktans değeri gözlenmektedir. 5 μm /100 μm ızgarasına ait toplam empedans değeri serbest uzay empedansından çok küçük olduğu için 40 GHz’te dahi anlamlı ekranlama etkinliği sonuçları elde edilebilmektedir. Bunun temel nedeni ise yüksek frekanslarda metalik ağ yapılarına ait empedans değerinin reaktans tarafından domine edilmesidir. Reaktansı düşürmenin en etkili yoluysa periyodu mümkün olduğunca düşük seçmektir. Optik kapaticılık faktörü aynı olan 5 μm /100 μm ve 100 μm /2000 μm ızgaraları için periyotların oranı 20 olarak hesaplanmaktadır. İki ızgaraya ait reaktans değerlerinin oranı da 20 olarak hesaplanmaktadır. 40 GHz’teki ekranlama etkinliğinde oluşan yaklaşık 20 dB’lik fark, periyodun 20 kat düşürülmesi sebebiyle ortaya çıkmaktadır.



Şekil 9.8 5 μm /100 μm Izgara Yapısı için Direnç ve Reaktans Sonuçları

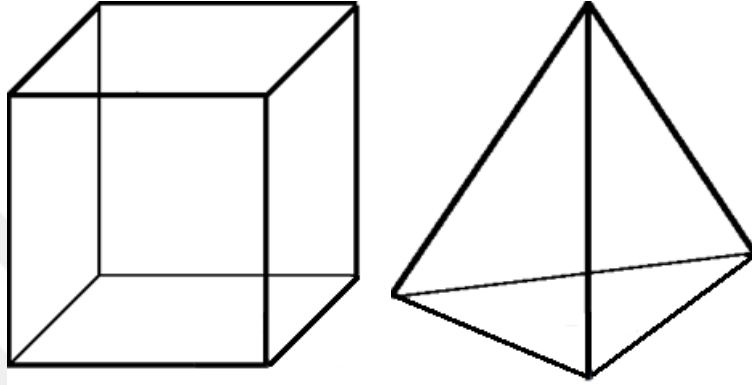


Şekil 9.9 5 µm/100 µm Izgara Yapısı için Ekranlama Etkinliği Sonuçları

Ulrich metoduna ait analiz sonuçları incelendiğinde optik kapaticılık sabitken periyodu, dolayısıyla hat genişliğini, azaltmak reaktansı azaltmaktadır. Reaktans azalması, empedans-frekans eğiminin azalması olarak ortaya çıkmaktadır. İndüktif ağ yapıları olarak tanımlanan metalik ağ yapılarının düşük frekanslarda (100 kHz komşuluğu) direnç değeri baskın olmaktadır. Böylece optik kapaticılık değeri daha yüksek olan metalik ağ yapısı, daha yüksek ekranlama etkinliğine sahip olmaktadır. Dalga boyu küçüldükçe ağ yapısı ile karşılaştırılabilir hale gelmektedir. Dolayısıyla yüksek frekanslarda reaktans baskın hale gelmektedir. Şekil 9.6’da görüldüğü gibi reaktans değeri dirençten çok daha büyük (yaklaşık 500 kat) büyük olabilmektedir. Bu durumda yüksek ekranlama etkinliği elde edebilmek için optik kapaticılığı artırmak gerekecektir. Optik kapaticılık sabitken, ekranlama etkinliği artırmanın yolu ise periyodu düşürmektir. Bu durumda hat genişliği de azalmaktadır. Dolayısıyla üretim teknikleri değişebilmektedir.

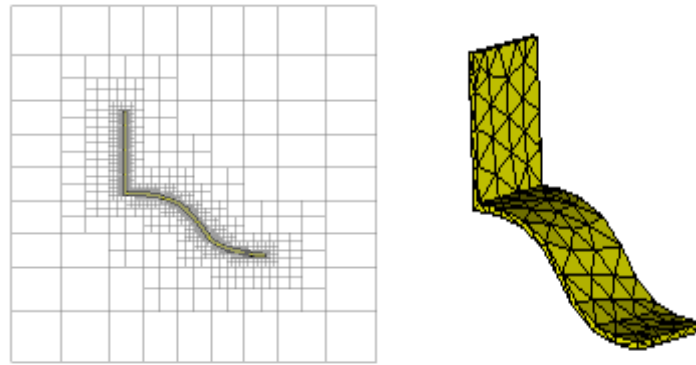
Sonraki aşamada matematiksel analiz sonuçları elektromanyetik simülasyon araçlarıyla doğrulanmaya çalışılmıştır. İlk aşamalarda Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio (MWS) kullanılmıştır. CST MWS periyodik yüzeyler aracı altında frekans seçici yüzey ve metamalzeme analizi yapmaya imkân tanımaktadır. Frekans seçici yüzeyler iki boyutlu ya da üç boyutlu olarak analiz edilebilmektedir. Fakat analiz

edilecek periyodik yapının birim modeline (kendini tekrarlayan yapıya) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereksinim üretim ve tasarım aşamalarını bir miktar zorlaştırmaktadır. Elektromanyetik dalganın geliş açısına göre analiz yapma ihtiyacı olduğundan frekans alanı çözücüsü tercih edilmiştir. Zaman alanı çözücüsü sadece dik gelen elektromanyetik dalga durumunu analiz edebilmektedir. Elektromanyetik analizi yapılacak nesnenin tamamının ağ ile kaplanması gerekmektedir.



Şekil 9.10 Altı Yüzlü ve Dört Yüzlü Ağ Yapısı Modelleri

CST MWS özelinde daha sık kullanılan dört yüzlü ve altı yüzlü olmak üzere iki tip ağ yapısı bulunmaktadır. Bu yapılar Şekil 9.10'da gösterilmektedir. Altı yüzlü ağ yapısı daha az sayıda ağ ile yüzeyi kaplayabilmekte ve karmaşık geometrilere kullanılabilir. Fakat malzeme geçişlerinin fazla olduğu yüzeylerde doğruluğu azalabilmektedir. Dört yüzlü ağ yapısı ise özellikle karmaşık geometrilere daha başarılı olmaktadır.

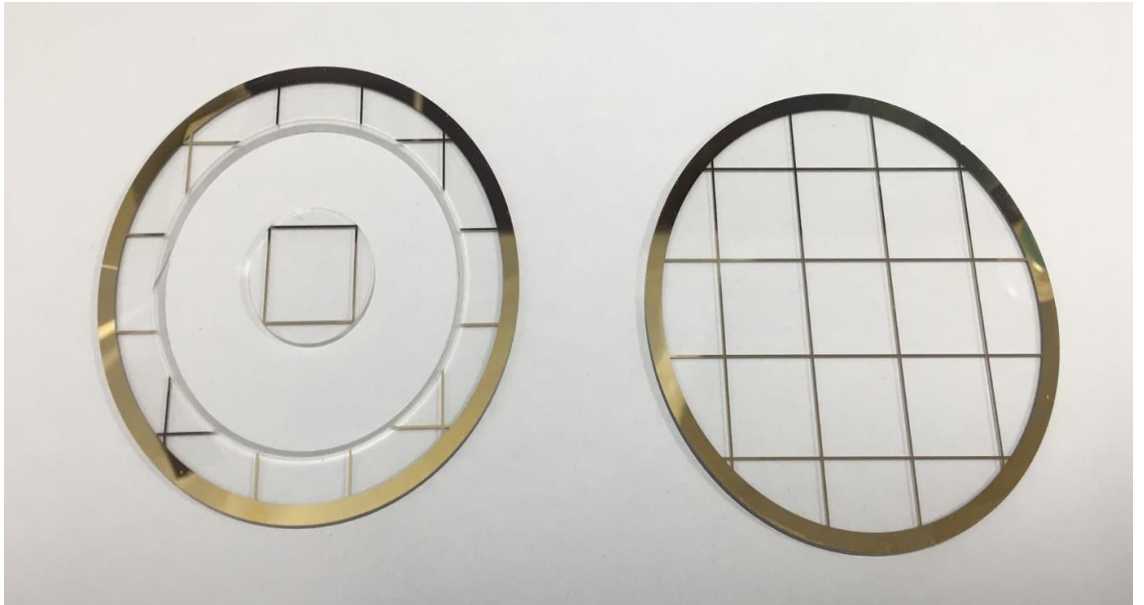


Şekil 9.11 Altı Yüzlü ve Dört Yüzlü Ağ Yapısı Kullanılmış Modeller

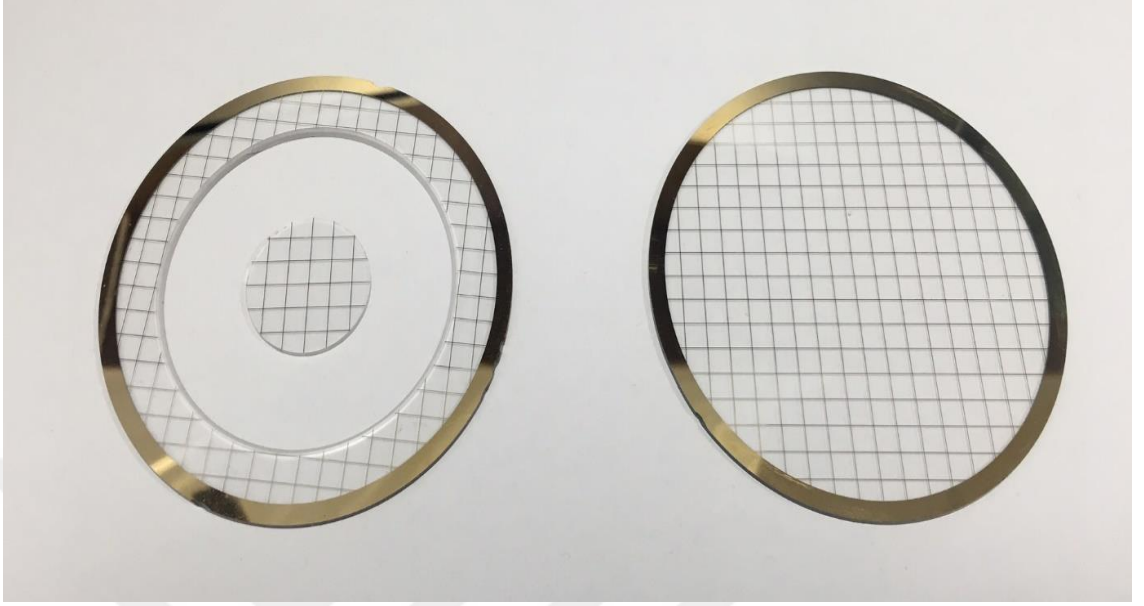
Şekil 9.11'de altı yüzlü ve dört yüzlü ağ yapısı kullanılmış örnekler gösterilmektedir. Buna göre altı yüzlü şekil kullanımı ile daha az hücre oluşmaktadır. Fakat şeklin eğim

oluşturduğu bölgelerin kapsanması zorlaşmaktadır. Fakat dört yüzlü ağ hem kenar hem de iç bölgelerde sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. Bu durumda da çözülmesi gereken bilinmeyen sayısı artmaktadır. Bu çalışmada kullanılacak metalik ağ yapıları için dielektrik geçişlerinin fazla olması ve kıvrımlı yapıların fazlaca kullanılması sebebiyle dört yüzlü ağ yapısı kullanımı tercih edilmiştir.

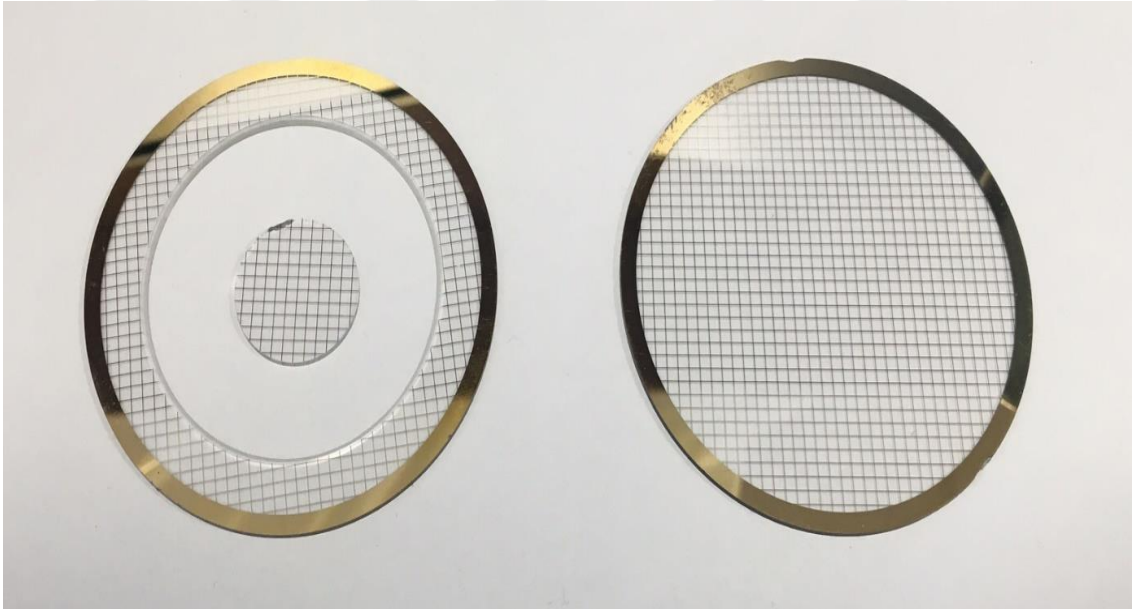
3" çapa sahip örnekler litografi yöntemiyle safir ve BK7 malzemeleri üzerine işlenmiştir. Her örnekten 2 adet üretilmiştir. Üretilen örneklerden bir tanesi koaksiyel tutucuda referans malzeme olarak kullanılmak üzere kesilmiştir. Kesim işlemi sonrasında metalik hatların durumu mikroskop altında incelenmiş ve temassızlık olmadığı doğrulanmıştır. Alttaş kesiminin litografi öncesinde yapılması kaplama ve hizalama işlemlerinde sorunlara yol açabilmektedir. Fotorezist (photoresist) kaplama cihazı (spinner machine) yardımıyla fotorezist malzemesi örnek üzerine homojen olarak yayılabilmektedir. Litografi öncesi kesilme yapılması durumunda kesilmiş bölgelerden kaynaklanan yansımalar oluşarak yapıyı bozabilmektedir. Bu nedenle örneğin zarar görmesi göze alınarak kesim işlemi litografi işleminden sonra yapılmıştır. Şekil 9.12, Şekil 9.13, Şekil 9.14 ve Şekil 9.15'te üretilen başarılı örnekler gösterilmiştir. Buharlaştırılan altın doğrudan fotorezist üzerine yapışmadığından ilk olarak 15 nm titanyum kaplanmış, sonrasında ise 150 nm altın uygulanmıştır.



Şekil 9.12 400 μm /16000 μm Izgara Yapısına Ait Referans ve Örnek Malzemeleri



Şekil 9.13 100 µm/4000 µm Izgara Yapısına Ait Referans ve Örnek Malzemeleri

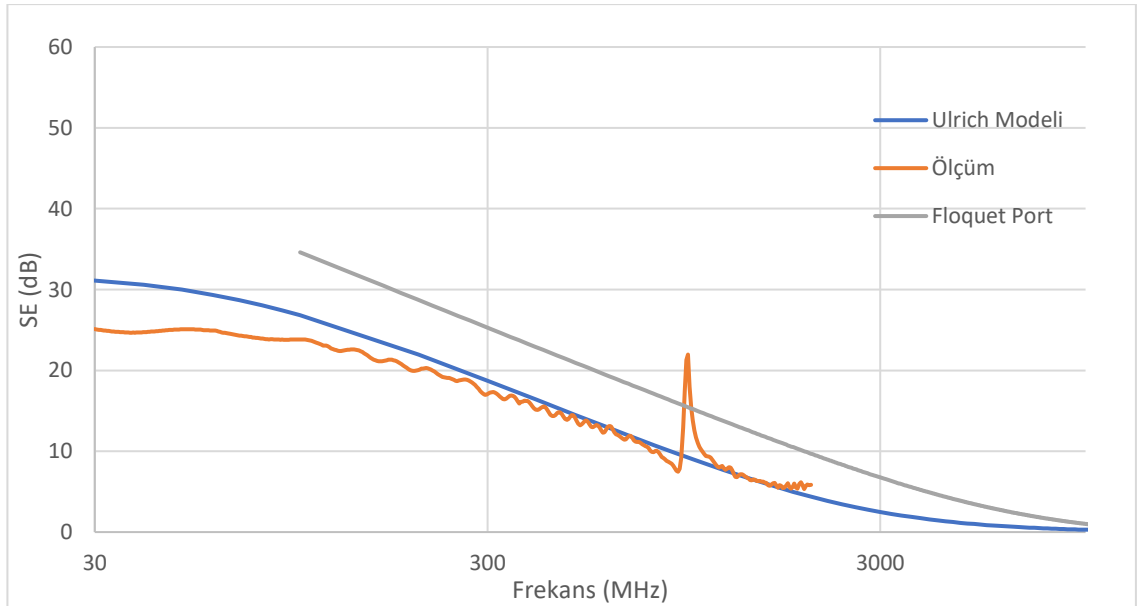


Şekil 9.14 100 µm/2000 µm Izgara Yapısına Ait Referans ve Örnek Malzemeleri



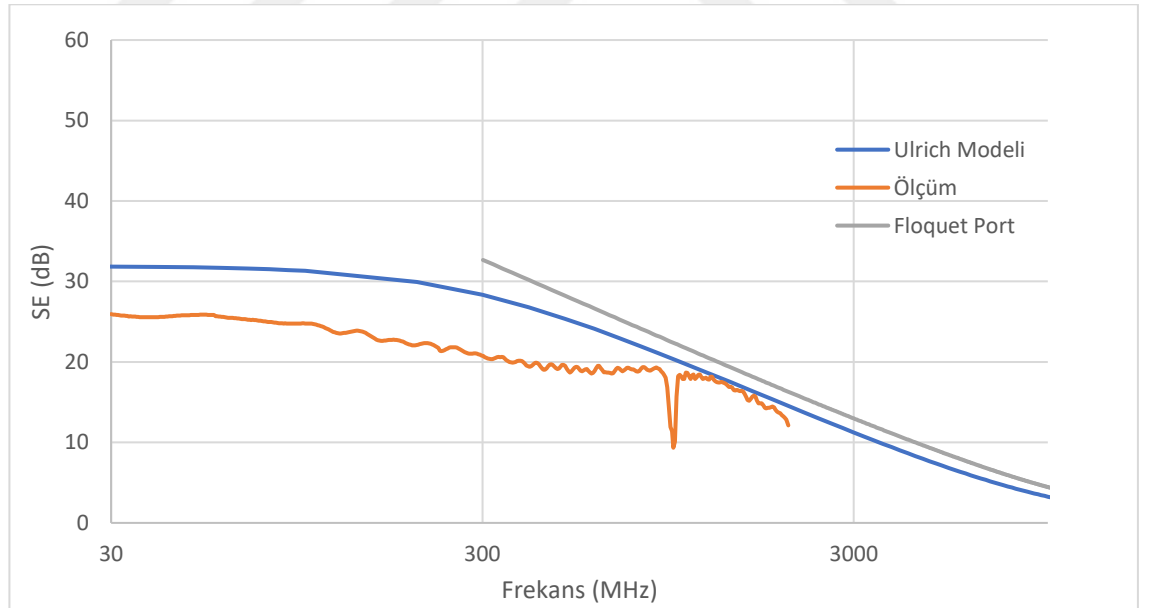
Şekil 9.15 5 μm /100 μm Izgara Yapısına Ait Referans ve Örnek Malzemeleri

Sonraki aşamada hazırlanan örneklerin 3" örnekler için tasarlanan koaksiyel tutucu yardımıyla iletim kayıpları ölçülmüştür. Ölçüm, Ulrich modeli ve simülasyon sonuçları Şekil 9.16, Şekil 9.17, Şekil 9.18 ve Şekil 9.19'da gösterilmiştir.



Şekil 9.16 400 μm /16000 μm Örneğe Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları

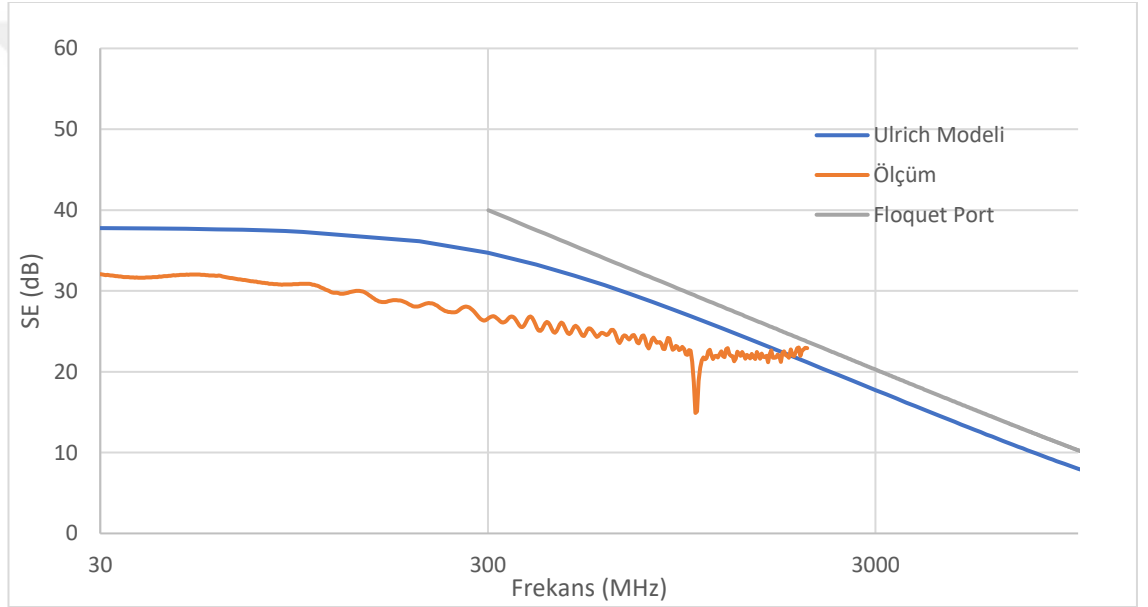
400 μm /16000 μm , 100 μm /4000 μm ve 100 μm /2000 μm örnekleri 1.5 mm BK7 alttaş üzerine uygulanmıştır. Bu sebeple bu 3 örnek için en yüksek frekans 7. Bölüm’ de de belirtildiği gibi 2 GHz olarak alınmıştır. 2 GHz kesim frekansı sonrasında ölçüm ve analiz eğriler benzer eğilime sahip olsa da aradaki farkın 3 dB değerinin üzerine çıktığı frekans aralıkları bulunmaktadır. Bu nedenle belirtilen 3 örnek için 2 GHz en yüksek frekans değeri olarak alınmıştır. Şekil 9.16’da verilen sonuçlar incelendiğinde, ölçümler 1 GHz civarında tepe yapmaktadır. Bu durum tüm ölçümlerde bulunmakta ve Şekil 7.6’da görüldüğü gibi fikstür empedansının 1 GHz komşuluğunda 50 Ω değerinden sapmasından kaynaklanmaktadır. Fikstür kapalıyken alınan ölçümlerde 1-1.2 GHz frekans aralığında empedans sapması gözlenirse de fikstür içine referans örnek koyulduğunda iletkenler arası boşluk artmaktadır. Bu nedenle boş fikstüre ait frekanslardan bir miktar kayma olabilmektedir. İkinci faktör ise fikstürün dielektrik boşluk kısmına gelen malzemenin etkisidir. Araya yerleştirilen malzemenin oluşturduğu kapasitans etkisi referans ve örnek ölçümlerinin birbirinden farklı sonuçlar üretmesine sebep olmaktadır. Bu bölge dışında ölçüm, Ulrich modeli ve Floquet Port simülasyonları sonuçları birbiri ile uyumludur.



Şekil 9.17 100 μm /4000 μm Örneğe Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları

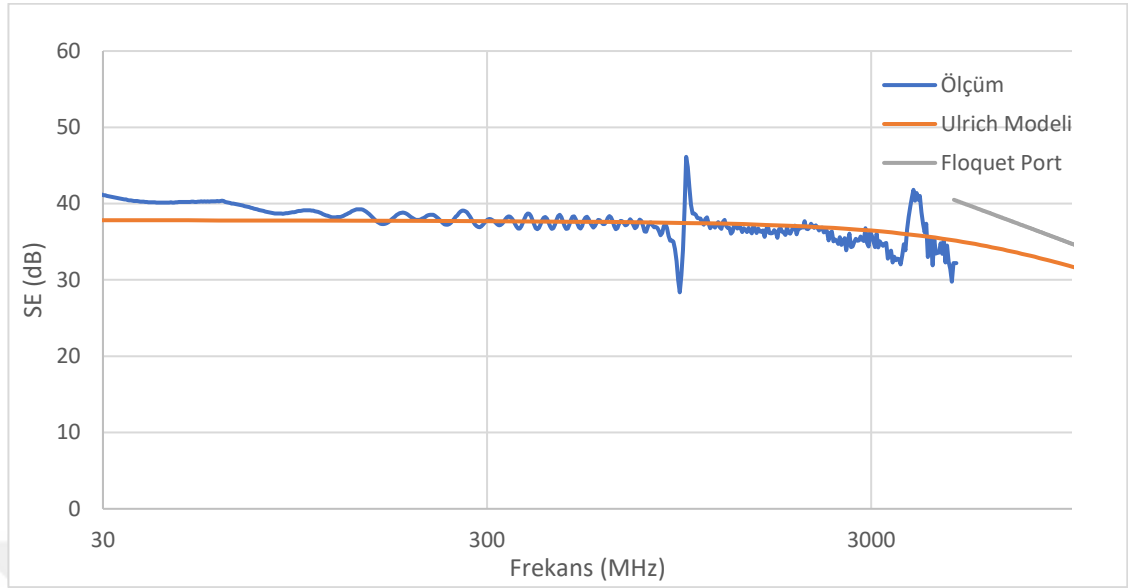
100 μm /4000 μm örneğinde 30 MHz – 500 MHz frekans aralığında Ulrich modeli ve ölçüm sonuçları arasında yaklaşık 6 dB fark bulunmaktadır. Bu fark standartta belirtilen

3 dB değerinden bir miktar daha fazladır. Ölçümler tekrarlanırsa da 6 dB değeri azaltılamamıştır. Örneklerin busbar bölgesinden iletkenlik değerleri ölçüldüğünde örnekler arasında herhangi bir fark bulunamamıştır. Mikroskop altında örnek incelendiğinde ise ufak çizilmeler gözlemlense de tamamen kopmuş hatlara rastlanmamıştır. İndüktif metalik ağ yapılarında düşük frekanslarda iletkenlik değeri baskın olmaktadır. Yüksek frekanslarda ise indükten, iletkenliğin yerini almaktadır. Bu nedenle 6 dB'lik farkın örnekteki hatların fikstür arasında sıkıştırılmaya bağlı olarak aşınması olduğu düşünülmektedir. 800 MHz sonrasında ölçüm ve analizler birbirine yaklaşmakta 1 GHz sonrasında ise aradaki fark 3 dB değerinin altına düşmektedir.



Şekil 9.18 100 µm/2000 µm Örneğe Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları

100 µm/2000 µm örneğine ait sonuçlar ise beklenildiği gibi uyumlu seyretnmektedir. Düşük frekanslardaki ölçüm ve Ulrich modeli arasında 5 dB'lik fark olsa da 1 GHz sonrasında ölçüm ve analiz sonuçları ± 3 dB seviyesine gelmektedir. Bu değer ASTM-D4935 standardının ölçüm hassasiyeti olarak belirtilmektedir (ASTM-D4935 1999).



Şekil 9.19 5 µm/100 µm Örneğe Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları

5 µm/100 µm örneği ise 500 µm safir alttaş üzerine uygulanmıştır. ASTM-D4935 standardında belirtilen $\lambda/100$ kuralına göre sonuçlar 6 GHz'e kadar paylaşılmıştır. Şekil 9.19'da gösterildiği gibi analiz sonuçları ve ölçümler 2.5 GHz'e kadar yakın seyretilmektedir. 2.5 GHz sonrasında koaksiyel tutucu içerisinde TEM dışında modlar da oluştuğundan ölçüm ve analiz arasında ± 3 dB'den daha fazla sapmalar olmaktadır.

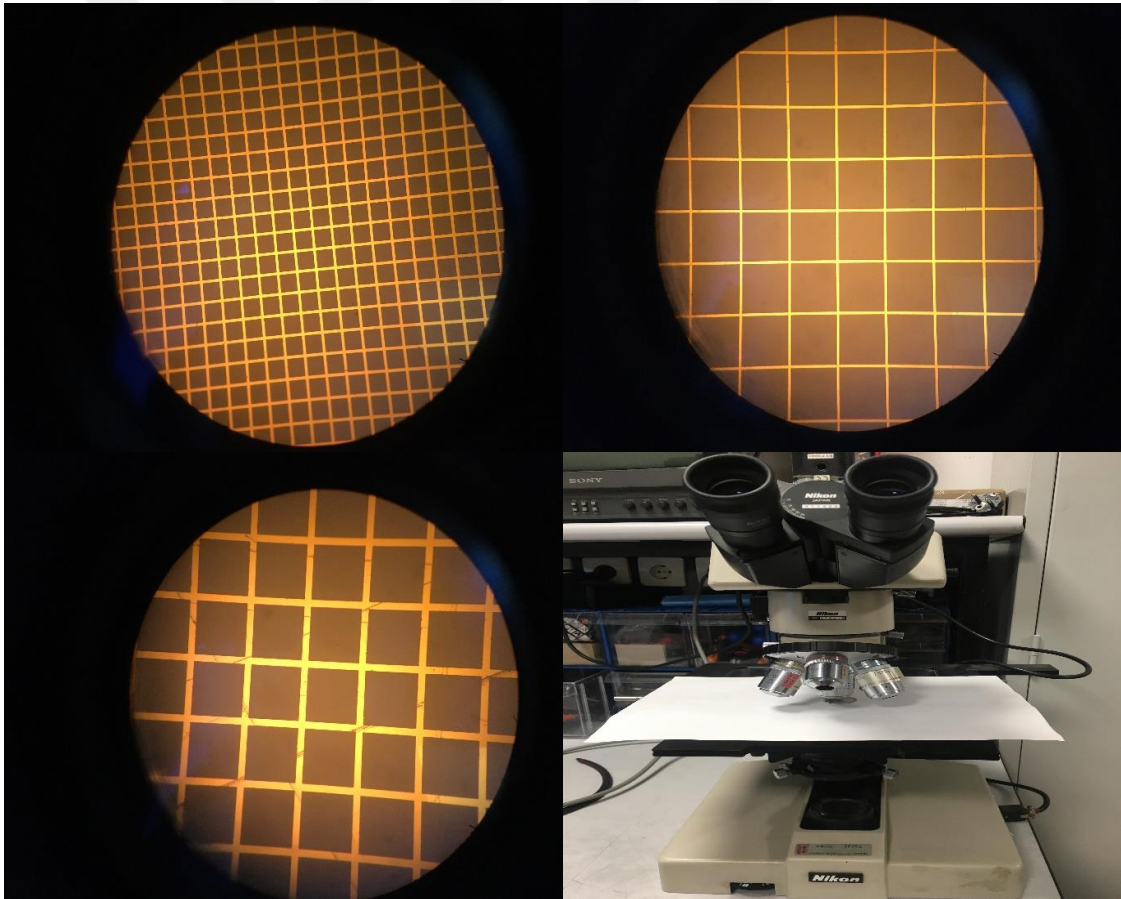
Sonuçlar incelendiğinde ölçüm, Ulrich Modeli ve Floquet Port sonuçlarının yakın seyrettiği gözlemlenmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi düşük frekanslarda iletkenlik değerleri ön planda olsa da frekans yükseldikçe indüktans etkisi baskın hale gelmektedir. 5 µm/100 µm ve 100 µm/2000 µm sonuçları incelendiğinde aynı optik kapaticılık değeri ile daha yüksek ekranlama etkinliği elde etmek için hat genişliğini ve periyodu azaltmak gerekmektedir. Hat genişliğini azaltmak ise daha karmaşık ve pahalı üretim prosesleri gerektirmektedir. 100 µm/4000 µm ve 100 µm/2000 µm sonuçları incelendiğinde ise aynı hat genişliği ile yaklaşık 5 dB'lik daha fazla ekranlama etkinliği elde edildiği gözlenmektedir. Üretim tekniğini ve uygulanacak örüntü şeklini değiştirmeden daha yüksek ekranlama etkinliği elde etmek için periyodu azaltmak gerekmektedir.

Sonraki aşamada ise daha yüksek frekanslarda ölçüm yapabilmek amacıyla 1" örnek boyutlarına uyumlu fikstür kullanılmıştır. Bu fikstüre ait detaylar 7. Bölümde anlatılmış

ve 11.5 GHz frekansına kadar kullanılabileceği gösterilmiştir. 11.5 GHz sonrasında ise VSWR değerinin yüksek olduğu bölgeler olsa da ölçüm alınabilecek frekans bantları bulunmaktadır. Bu nedenle ölçümler 18 GHz'e kadar paylaşılmıştır. Fakat 30 MHz – 11.5 GHz frekans aralığı güvenilir olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla aşağıda belirtilen boyutlarda 3 adet ızgara üretilmiştir.

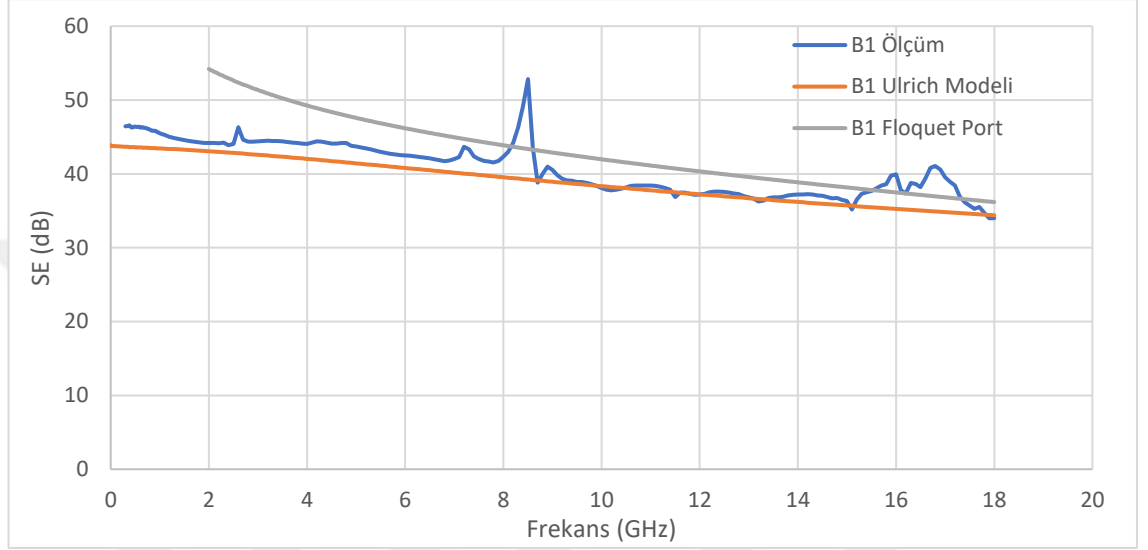
Çizelge 9.2 1" Boyutlarındaki Örnek Özellikleri (Günay vd. 2021)

Örnek	Hat Genişliği (μm)	Periyot (μm)	Kapaticılık (%)
B1	5	50	20
B3	5	125	8
B4	15	150	20

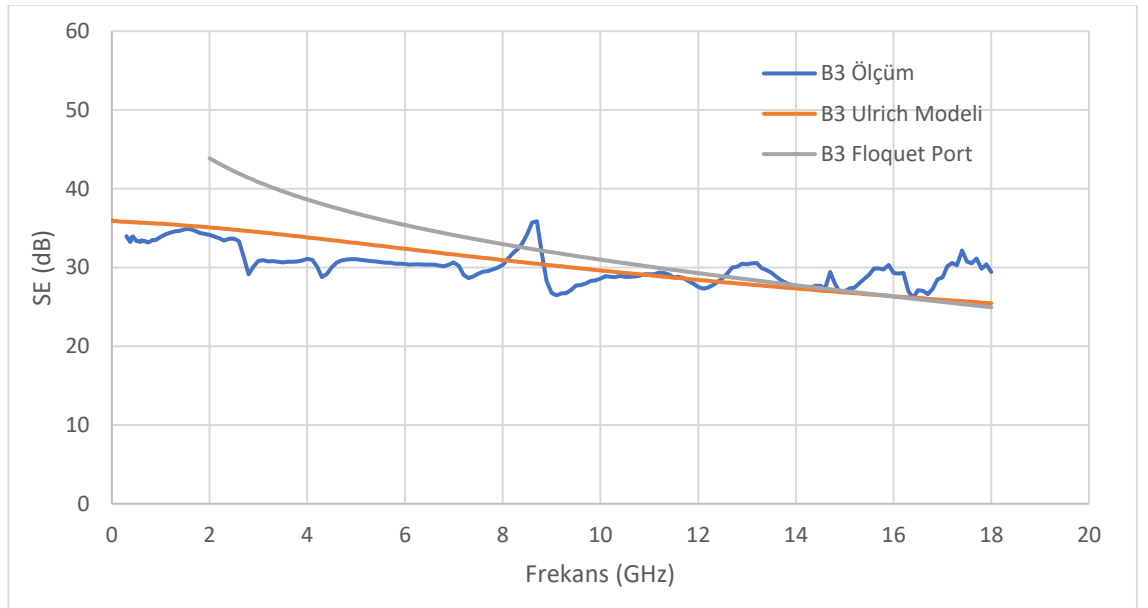


Şekil 9.20 Örneklere ait Izgara Yapıları (Sol üstte B1, sağ üstte B3, sol altta B4 ve sağ altta görüntülerin alındığı mikroskop düzeneği)

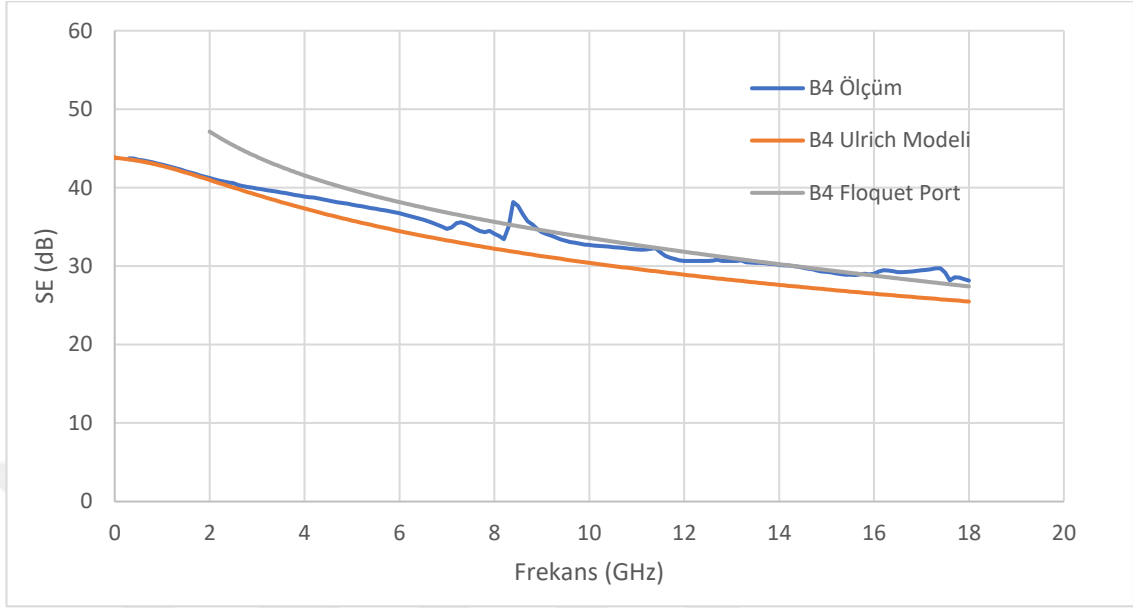
Şekil 9.20’de gösterilen ızgara boyutları çıplak göz ile incelemek için oldukça küçüktür. Bu sebeple mikroskop altında incelenmiştir. Dikkatle bakıldığında Koaksiyel tutucu ölçümlerinde iki metal plaka arasına sıkışan hatların zarar gördüğü incelenebilmektedir. Örneğin zarar görebilme ihtimali düşünülerek hassas ölçümlerin ekranlama etkinliği testlerinden önce yapılması faydalı olmaktadır.



Şekil 9.21 B1 Örneğine Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları



Şekil 9.22 B3 Örneğine Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları

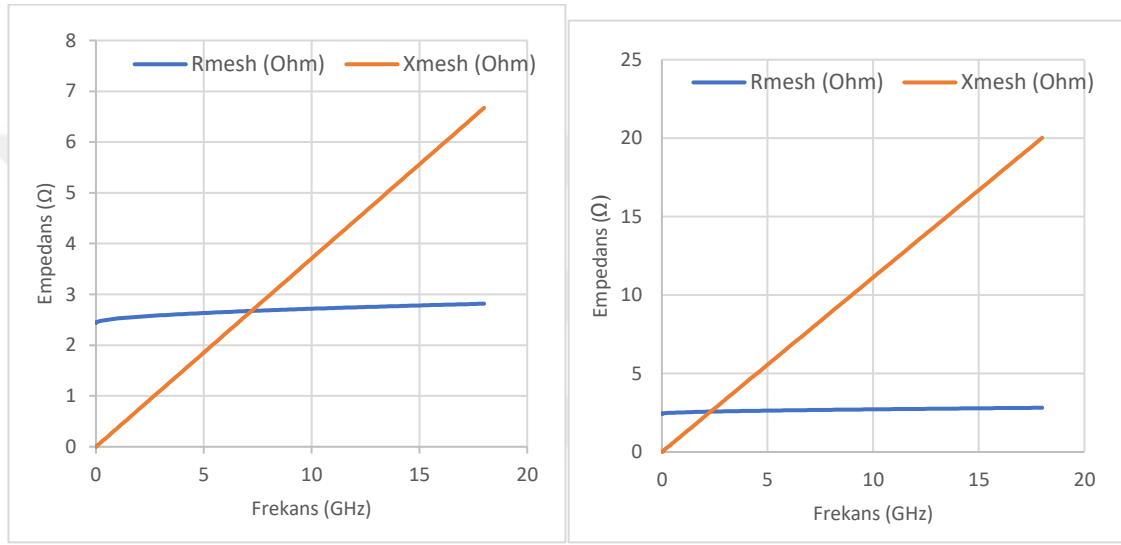


Şekil 9.23 B4 Örneğine Ait Ölçüm ve Analiz Sonuçları

Önceki ölçümlerde olduğu gibi burada da sonuçları değerlendirmek amacıyla ölçümler, Ulrich tarafından önerilen analiz yöntemi ve CST MWS Floquet Mod yaklaşımı kullanılmıştır. CST Floquet Mode yaklaşımında hat genişliğine bağlı olarak port uzunlukları belirlenmektedir. Mikron mertebesinde uzunluğa sahip hatlar kullanıldığında port uzunlukları kısaldığından frekans azaldıkça port yakın alanda kalmaktadır. Bu nedenle düşük frekanslara gittikçe Floquet analizlerinin hata payı artmaktadır. Ölçümler, Ulrich Modeli ve Floquet Port analiz sonuçları Şekil 9.21, Şekil 9.22 ve Şekil 9.23'te gösterilmiştir. Buna göre tüm sonuçlar birbiriyle uyumludur. Yüzeylerin altın kaplanması amacıyla buharlaştırma işlemine bağlı olarak iletkenlik azalması ve BK7 alttaşının dielektrik etkileri, Ulrich Metodu ve Floquet Port analizlerine dahil edilmiştir.

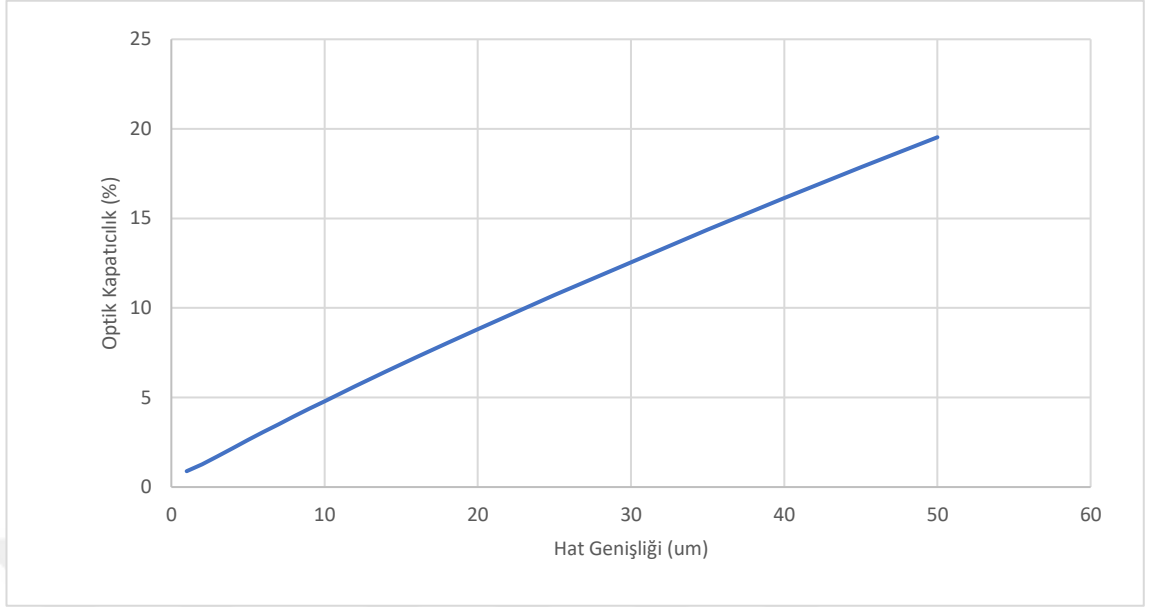
Izgara yapısı için dalga kılavuzu modeli ilk olarak Marcuvitz , sonrasında Ulrich (Ulrich 1967) tarafından indüktif ızgara olarak tanımlanmıştır. Burada belirtilen sonuçlara göre başarılı bir model olarak kendini kanıtlamaktadır. Bu modele göre hem direnç hem de reaktans frekansa bağlı olarak tanımlanmakta ve yüksek frekanslarda hata payı azaltılmaktadır. Reaktans değeri düşük frekanslarda etkisiz gibi görünse de frekans

arttıkça baskın parametre haline gelmektedir. Ulrich'in belirttiği gibi, ızgara yapısının periyot (g) ve çizgi kalınlığı ($2a$) değerleri reaktansı etkileyen en önemli parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunu vurgulamak için B1 ve B4 örnekleri analiz edilebilmektedir. Her iki örnek de yaklaşık 10 dB ekranlama etkinliği farkıyla aynı optik kapaticılığa sahiptir. B1 ve B4 örneklerinin DC direnci Şekil 9.24'te gösterildiği gibi eşittir. Ancak örneklerin reaktans kısmı hat genişliklerinin oranının bir sonucu olarak 3 kat farklılık göstermektedir.



Şekil 9.24 B1 (5 µm/50 µm) (Sol) ve B4 (15 µm/150 µm) (Sağ) Örneklerine ait Empedans Değişimi

Sabit ekranlama etkinliği gereksinimi ile, azalan hat genişliği optik geçirgenliğin artmasını sağlamaktadır. Öte yandan, hat genişliğinin azaltılması, karmaşık üretim teknikleri dezavantajıyla birlikte gelmektedir. Şekil 9.25'te 18 GHz'e kadar minimum 15 dB ekranlama etkinliği oluşturmak için gereken hat genişliği ve optik kapaticılık parametrelerinin değişimi gösterilmektedir. Ekranlama etkinliği sabit olduğunda, Ulrich Metodu yardımıyla hat genişliğine karşılık gelen periyot kullanılarak optik kapaticılık hesaplanarak gösterilmiştir. Buna göre ekranlama etkinliği sabitken hat genişliği azaldıkça, optik kapaticılık da azalmaktadır. Diğer yöntemlerle birlikte aşağıda verilen sonuçlar değerlendirildiğinde metalik ağ yapıları, yüksek ekranlama etkinliği ve yüksek optik geçirgenlik gerektiren uygulamalarda en ciddi adaylar olarak öne çıkmaktadır.



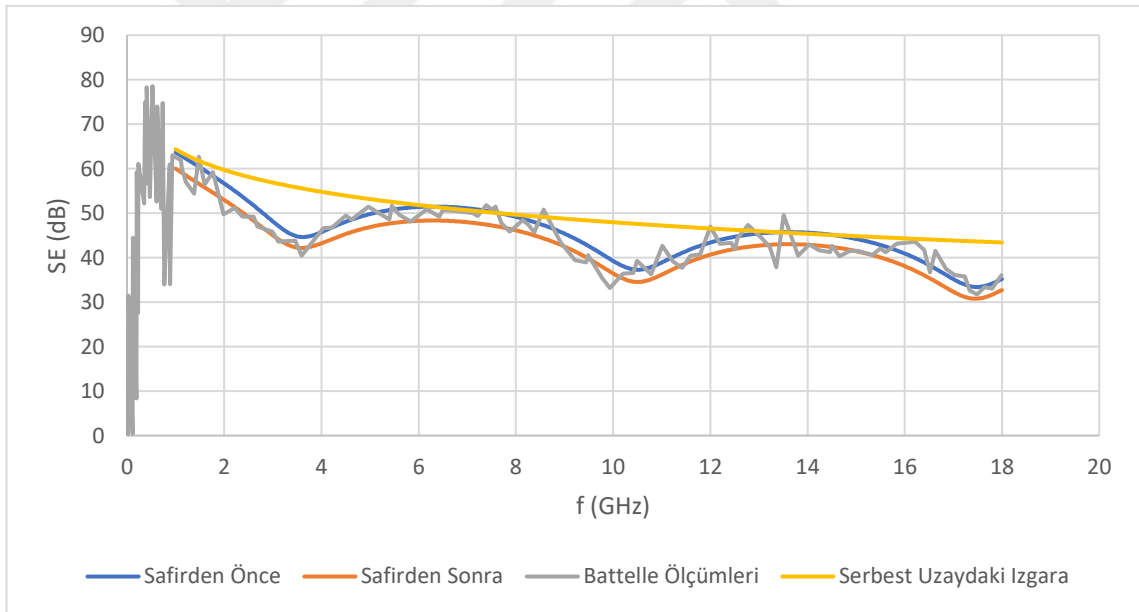
Şekil 9.25 18 GHz'e kadar 15 dB Ekranlama Etkinliği Sağlayan Hat Genişliği ve Optik Kapatıcılık Değerleri

Bağımsız ızgara analizinin basitliğine rağmen, geręek hayatta ızgaralar, çeşitli dielektrik özelliklere sahip alttaşlar üzerine uygulanmaktadır. Optik uygulamalar özelinde ise BK7, kuvars, safir, germanyum, ZnS (inko sülfit) vb. gibi çeşitli optik dalga boylarında geçirgen alttaşların kullanımını gerektirmektedir. Çizelge 9.3'te sıklıkla kullanılan bazı optik alttaşların elektriksel özellikleri verilmiştir. Bu malzemeler, bağlı dielektrik sabitlerinin yüksek olması sebebiyle kapasitif etki sergilemektedirler. Böylece rezonans frekansını ve ekranlama etkinliği performansını doğrudan etkilemektedirler.

Çizelge 9.3 Bazı Alttaşların Dielektrik Sabitleri (Harris 1999)

Malzeme	Dielektrik Sabiti	Kayıp Tanjantı
Kuvars	3.2	0.008
Safir	9.39/11.58	0.0005/0.00006
ZnS (inko Sülfit)	8.35	0.0024
Kaynaşmış Silika	3.33	0.001
Silikon	12	0.009

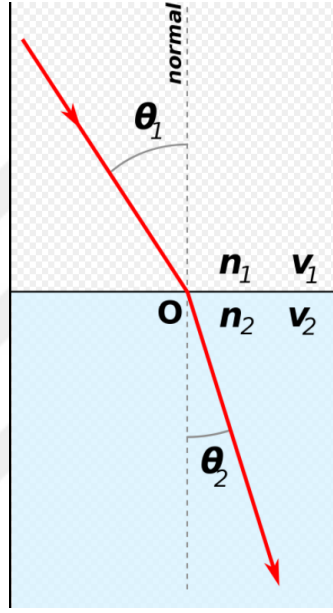
Boş uzaydaki bir ızgara, periyodu dalga boyuna eşit olduğunda yayılım yapmaya başlamaktadır. Bu fenomene Wood Anomalisi ve bu frekansa rezonans frekansı denmektedir (Luebbers ve Munk 1978). Analize bir dielektrik malzeme eklendiğinde, dielektrik malzemede hapsolan dalgalar nedeniyle rezonans frekansı düşme eğiliminde olmaktadır (Callaghan vd. 1991). Dielektrik malzeme varlığı ile rezonans frekansının değişimi Şekil 9.26'da gösterilmektedir. Izgara performansı üzerindeki kapasitans etkisini vurgulamak için B1 ızgarası tek başına ve 6.35 mm safir alttaş üzerinde analiz edilmiştir. Tek başına analiz edildiğinde ızgara periyodu 12 THz'te rezonansa neden olmaktadır. Ekranlama etkinliği değeri, rezonans frekansına kadar azalan bir eğilime sahip olmaktadır. Ancak analizlere safir alttaş eklendiğinde 3.5 GHz, 10.5 GHz ve 17.5 GHz'te rezonans düşüşleri ortaya çıkmaktadır. Malzeme kalınlığı dalga boyunun iki katı olduğunda, ekranlama etkinliği performansı tek başına yapılan analiz sonuçlarına yaklaşmaktadır.



Şekil 9.26 Battelle Laboratuvarı'nın ölçümleri ile Analizlerin Karşılaştırılması (Jacoby vd. 2009)

Dielektrik alttaşın diğer bir etkisi ise gelen elektromanyetik dalganın kırılmasıdır. Elektromanyetik dalganın bir ortamdan başka bir ortama geçerken, ortamların kırılma indislerine bağlı olarak kırılması Snell Kanunu olarak bilinmektedir. Buna göre dalganın yüzey normali ile yaptığı açılarının sinüsü, ortam kırıcılık indisleri oranına eşit olmaktadır.

Kırılma indisi aynı zamanda elektromanyetik dalganın ortam içindeki hızıyla ilgili bilgi de vermektedir. Kırılma indisi yüksek olan ortamlarda dalga daha yavaş, düşük olan ortamlarda ise daha hızlı ilerlemektedir. Ortamdaki hız ise $1/\sqrt{\epsilon\mu}$ şeklinde ifade edilmektedir. Manyetik geçirgenlik değeri optik malzemelerde 1'e çok yakın olduğundan ihmal edilebilmektedir. Böylece kırıcılık indisi elektrik geçirgenliğin karekökü ile değişmektedir. Diğer bir ifadeyle dielektrik sabiti yüksek olan malzemelerin kırıcılık indisleri de yüksek olmaktadır.

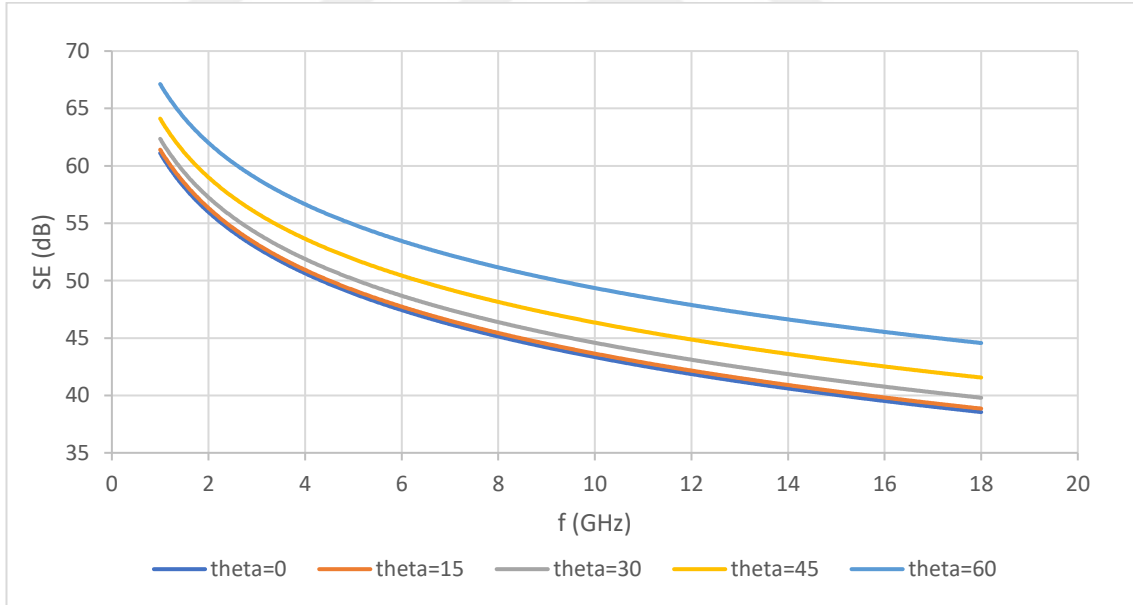


Şekil 9.27 Snell Kanunu Gösterimi

Dış dünya ile arayüzü sağlayan optik camın, hedefe dik ve dike yakın baktığı açılarda bu etki göz ardı edilebilmektedir. Fakat optik cam sabitken ve diğer optik bileşenler bağımsız olarak hareket edebiliyorsa ya da Radom benzeri konformal (conformal) bir tasarım yapıldığında geliş açısından bağımsız bir tasarım yapılması gerekmektedir. Şekil 9.28'de Lockheed-Martin firmasına ait F-35 uçağına ait elektro-optik hedefleme sistemi gösterilmektedir. Cam ve hedef arası açı sabit olmadığından geniş bir geliş açısına göre metalik örüntü uygulanması gerekmektedir. Şekil 9.29'da elektromanyetik dalganın geliş açısına göre ekranlama etkinliği değişimi gösterilmektedir. Buna göre cam kalınlığı sabit olduğunda geliş açısı arttıkça, ekranlama etkinliğinin arttığı gözlenmektedir.



Şekil 9.28 F-35 Uçağına ait Elektro-Optik Hedefleme Sistemi



Şekil 9.29 Elektromanyetik Dalganın Geliş Açısına Göre Ekranlama Etkinliği

Bu durumu ortadan kaldırma yollarından birisi metalik örüntüyü ortaya alarak içte ve dışta uygun kalınlığına ve dielektrik sabitine sahip katmanlar kullanmaktır (Luebbers ve Munk 1978). Bu sayede metalik ağ yapısının performansı, elektromanyetik dalganın geliş açısından bağımsız hale gelmektedir.

Bir dielektrik katmanın varlığı, yüzey dalgası sıfır frekansını (null frequency) düşürürken, ızgara loblarının yayılım yaptığı rezonans frekansını etkilememektedir. Bu durum, Floquet modlarını incelendiğinde görülebilmektedir. Ancak bu gerçeğin daha fiziksel bir açıklaması da yapılabilmektedir. Şekil 9.27'de, dielektrikle kaplı bir dizi ince yarık üzerine gelen bir düzlem dalga'nın geometrisi gösterilmektedir. Snell kanunu kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilebilmektedir:

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}} \quad (9.4)$$

Boş uzayda, bitişik elemanlar arasındaki elektriksel boşluk 2π rad olduğunda ızgara yapısı yayılım yapmaya başlayacaktır. Dielektrik katman varlığında ise dielektrik ortamdaki ızgara lobu yönünün açısı olan θ_g , dielektrik malzeme için kritik açı olan θ_c 'den küçük olana kadar yayılım olmamaktadır.

$$\sin\theta_c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_1}} \quad (9.5)$$

$\theta_g = \theta_c$ olduğu durumda

$$K_1 d_x \sin\theta_r + K_1 d_x \sin\theta_c = 2\pi \quad (9.6)$$

Yukarıdaki formüller kullanılarak sadeleştirildiğinde:

$$K_0 d_x (1 + \sin\theta_i) = 2\pi \quad (9.7)$$

İfadesine dönüşmektedir. Bu ifade de serbest uzaydaki yayılım ifadesiyle aynıdır. Böylece ızgaraların yayılım yaptığı frekansın, dielektrik katman varlığıyla değişmediği ifade edilebilmektedir (Luebbers ve Munk 1978).

Optik açıklıklara uygulanan metalik ağ örüntüsü hem elektromanyetik performansı hem de optik performansı etkilemektedir. Örüntünün optik etkisi geçirgenlik kaybı, kırınım ve Modülasyon Transfer Fonksiyonu etkileri olarak ortaya çıkmaktadır. Yapı boyutları optik analiz yapabilmek için uygun olmadığından ölçümlerle doğrulama yolu tercih edilmiştir.

Fakat elektromanyetik analiz kısmında analiz ve ölçüm sonuçları birbirine paralel seyretmektedir. Bu aşamaya kadar ekranlama etkinliği performansının aşağıdaki parametrelere bağlı olduğu ifade edilmiştir:

- 1- Örüntü tipi
- 2- Örüntü genişliği
- 3- Örüntü periyodu
- 4- Örüntü kalınlığı
- 5- Alttaş dielektrik etkisi

Elde edilen ekranlama etkinliği yukarıda belirtilen parametrelerin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Tasarımda aşamasında ise genellikle ekranlama etkinliği gereksinimi üzerinden parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle şimdiye kadar yapılan çalışmaların tam tersi yönde ilerlemesi gerekmektedir. Bu nedenle optik performans için en uygun örüntü tipi belirlendikten sonra elektromanyetik simülasyon araçları yardımıyla diğer parametrelerin analiz edilmesi gerekmektedir. Ayrıca optik ve elektromanyetik performans, birbiriyle zıt ilişkili olduğundan parametrelerin optimize edilmesi de gerekmektedir. 8. bölümde de belirtildiği gibi optimizasyon amaç fonksiyonunun girdileri ile maksimum veya minimum değerlerin hesaplanması anlamına gelmektedir. Burada amaç fonksiyonu türevlenebilir bir yapıda olmadığından Stokastik Optimizasyon Algoritmaları tercih edilmiştir. Stokastik optimizasyonun altında ise karmaşık problemleri daha kısa sürede çözmesi ve yerel minimumları tespit etme yeteneğiyle popülasyon algoritmaları öne çıkmaktadır. Bu aşamada ise literatürdeki benzer problemlerdeki başarıları nedeniyle Genetik Algoritma ve Parçacık Sürüşü Algoritması kullanılmıştır (Whitbourn ve Compton 1985), (Chen 1970). Örüntü genişliğinin periyoda oranı sabitken genişliğin azaltılması ekranlama etkinliğini artırmaktadır. Diğer bir ifadeyle optik kapaticılık sabitken en büyük ekranlama etkinliği değeri, en düşük örüntü genişliği ile elde edilmektedir. Bu sebeple optimizasyon için en düşük üretim seviyesi olan 1 μm seçilmiştir. Periyot, alttaş kalınlığı ve optik kapaticılık değerleri ise optimizasyon parametreleri olarak belirlenmiştir.

Çizelge 9.4 Genetik Algoritma Optimizasyonu Yöntemiyle Bulunan Analiz Sonuçları

İlk Popülasyonu Oluşturmak için Kullanılan Yayılma Tekniği	Mutasyon Oranı	Periyot (μm)	Alttaş Kalınlığı (mm)	Optik Kapatıcılık (%)	En Düşük Ekranlama Etkinliği Değeri (dB)
Latin Hiperküp Dağılımı	%60	116.25	0.55	1.72	15.8
	%30	117.47	0.66	1.70	15,5
	%1	111.02	2.24	1.8	15.1
Rastgele Düzgün Dağılım	%60	108	0.79	1.85	15.9
	%30	111.66	2.39	1.79	15.1
	%1	100.17	0.80	1.99	16.4

Çizelge 9.5 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Yöntemiyle Bulunan Analiz Sonuçları

İlk Sürüyü Oluşturmak için Kullanılan Yayılma Tekniği	Periyot (μm)	Alttaş Kalınlığı (mm)	Optik Kapatıcılık (%)	En Düşük Ekranlama Etkinliği Değeri (dB)
Latin Hiperküp Dağılımı	113.68	1.16	1.76	15.2
Rastgele Düzgün Dağılım	108.61	0.68	1.84	16.1

Optimizasyon CST MWS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çözücü olarak Frekans alanı çözücüsü kullanılmıştır. Genetik Algoritma Optimizasyonunda ilk popülasyon boyutu 64 olarak seçilmiştir. Yenileme sayısı 30 ile sınırlandırılmıştır. Parametrik sonuçlar otomatik olarak kaydedilmiş ve parametre değişimi sırasında ağ hareket etmesine izin verilmiştir. Varsayılan %10 çapa değeri aynen kullanılmıştır. Optimizasyon kriteri olarak ekranlama etkinliğinin 1 – 18 GHz frekans bandında en az 15 dB olması, optik kapatıcılık değerininse %2'den küçük olması belirlenmiştir. Periyot değerinin 90 – 150 μm aralığında değişmesine, alttaş kalınlığının 0.5 – 2.5 mm aralığında optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. En yüksek optik geçirgenlik değeri Genetik Algoritma

Optimizasyonunda 117.47 μm periyot ve 0.66 mm alttaş kalınlığı değerlerinde elde edilmiştir. Parçacık Sürüsü Optimizasyonunda ise sürü büyüklüğü olarak 66 seçilmiştir. En çok yinleme sayısı 15 olarak alınmış ve Genetik Algoritma Optimizasyonu ile toplam değerlendirme sayıları eşitlenmiştir. Böylece her iki algoritma da aynı seviyede karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Hem Genetik Algoritma hem de Parçacık Sürüsü Optimizasyonu frekans seçici yüzey uygulamaları için uygun bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada ITO kaplamalar, grafen, metalik nano kaplamalar ve metalik ağ yapıları, optik geçirgenlik ve ekranlama etkinliği parametreleri açısından karşılaştırılmıştır. Tüm analiz sonuçları Çizelge 9.6'da özetlenmiştir. Grafen, soğurma uygulamaları için umut verici bir yöntemdir. Ancak, mevcut çalışmalar ekranlama etkinliği üzerinde minimal etki belirtmektedir ve bu amaç için tek materyal olarak kullanılması beklenmemektedir (Nair vd. 2008). Metalik nano kaplamalar, 14.45 dB ekranlama etkinliği ile optik iletimde $\frac{1}{4}$ azalmaya neden olmaktadır. Orta düzeyde ekranlama ve optik geçirgenliğin yeterli olduğu uygulamalarda nano kaplamalar tercih edilebilmektedir. Öte yandan, ITO hem grafen hem de nano kaplamalardan daha iyi performansa sahiptir. Görünür bantta ve 1000 nm komşuluğunda %16 optik geçirgenlik kaybı ve 19.27 dB ekranlama etkinliği ile frekans seçici optik cam uygulamalarının çoğu için yeterli performans sağlamaktadır. ITO'nun popüleritesi, etkinliği ve uygulanabilirliği ile ilgilidir. Metalik ağ yapıları ise yüksek ekranlama ve optik geçirgenlik gerektiren uygulamalar için en iyi adaydır. 36 dB ekranlama sadece %5 optik geçirgenlik kaybı ile sağlanabilmektedir. Ancak, ölçülen örneklerde %20 geçirgenlik kaybıyla 36 dB ekranlama gerçekleşmiş ve karşılaştırmaya bu şekilde eklenmiştir. Yöntemin MTF azalması, dielektrik ve kırınım etkileri gibi dezavantajları dikkatli analiz gerektirmektedir.

Çizelge 9.6 Optik Camlar için Frekans Seçici Yüzey Tasarım Yöntemleri
Karşılaştırması (Günay vd. 2021)

Yöntem	Ekranlama Etkinliği (dB)	Optik Geçirgenlik (%)	Kullanılan Dalga boyu
ITO	18.7	84	Görünür Bant
Grafen	2.27	97.7	Geniş Bant
Nano Kaplamalar	14.45	75	Görünür Bant
Metalik Ağ Yapıları	36 (@18 GHz)	80	Geniş Bant

10. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada optik uygulamalar için yüzey iletkenliğini artırma yöntemlerinden, yöntemlerin avantajlarından ve dezavantajlarından, bu yöntemlerin ölçüm metotlarından bahsedilmiştir. Literatürde yüzey iletkenliğini artırarak ekranlama etkinliği sağlayan 6 adet metot bulunmuştur. Metotlardan iletken polimerler yüksek sıcaklık, nem ve UV ışınlarına maruz kaldığında iletkenlik azalmasına sebep olduğu için uygulanabilir bulunmamıştır. Karbon nano tüpler ise bağlantı noktalarındaki temassızlıkların ve ince pürüzlerin iletkenliği %50'ye kadar değiştirmesi nedeniyle tekrarlanabilir üretim performansı gösterememektedir. Bu sebeple tercih edilmemiştir. Askeri platformlarda kullanılabileceği değerlendirilen 4 adet yöntem (ITO, Grafen, Metal Nano Kaplamalar ve Metalik Ağ Yapıları) uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır. Her bir yüzey iletkenliği artırma yönteminin hangi optik bant içerisinde kullanılabileceği ve karşılık gelen ekranlama etkinliği performansı ölçülmüştür.

Aday yöntemlerden ITO kaplamalar olgunlaşmış üretim teknikleri ve ortalama üstü ekranlama etkinliği ile öne çıkmaktadır. Fakat görünür ve yakın kızılötesi bant dışında geçirgenlik hızla düşmektedir. Bu nedenle sınırlı kullanım alanına sahiptir.

Grafen kaplamalar mukavemet ve üretim teknikleri bakımından geliştirmeye ihtiyaç duymaktadır. Fakat küçük numuneler üzerinden yapılan testler ve teorik yaklaşımla belirlenen performansı gelecekte geri yansımanın kritik olduğu uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir. Tek başına olmasa da hibrit çözümlerde kullanımı olası görünmektedir.

Metalik nano kaplamalar optik geçirgenlik kaybı başına elde edilen ekranlama etkinliği bakımından ITO'dan daha kötü performans sergilemektedir. Kullanılabilir optik bant bakımından da ITO ile benzer özellikler göstermektedir.

Aday yöntemler içerisinde yüksek ekranlama etkinliği, yüksek optik geçirgenlik ve geniş bant kullanılabilirlik bakımından Metalik Ağ Yapıları öne çıkmaktadır. Bu sebeple Metalik Ağ Yapıları daha detaylı analiz edilerek tasarımı etkileyen parametreler ve analiz

metotları paylaşılmıştır. Metalik Ağ Yapılarını üretmek için kalın baskı film ve püskürtmeli baskı yöntemleri de kullanılabilse de optik geçirgenliği yüksek tutmak için fotolitografi yöntemi tercih edilmiştir. Özellikle kalın baskı film yöntemi ile elde edilen örüntüler görüntü kalitesini bozabilecek seviyelerdedir. Bu nedenle optik sistem parametreleri ve performansı da dikkate alınarak üretim yönteminin belirlenmesi gerekmektedir. Sonrasında tasarım parametreleri stokastik algoritmalarından Genetik Algoritma ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu kullanılarak optimize edilmiştir. Her iki algoritma da problemi çözmede başarılı olmuştur.

Yüzey iletkenliği artırma yöntemlerini karşılaştırma esnasında maliyeti düşük tutmak ve deneme sayısını artırmak amacıyla küçük boyutlu örnek kullanımı zorunlu olmuştur. Bu nedenle 1” boyutlarındaki örneklerle koaksiyel tutucu kullanılmıştır. Öncelikle bir referans örnek kullanılarak koaksiyel yapının bozulmasının etkileri ölçülmektedir. Sonrasında gerçek örnek ölçülmekte ve aradaki fark iletim kaybını belirtmektedir. Koaksiyel tutucu küçük örnekleri geniş frekans bandında ve TEM modunda incelemek için oldukça uygun bir yöntemdir. Ayrıca dikdörtgen dalga kılavuzu yönteminde olduğu gibi birden fazla örnek üretimi ihtiyacı da olmamaktadır. Küçük örneklerde analiz çalışmaları tamamlandıktan sonra 3” boyutlarındaki koaksiyel tutucu ve anten çifti yöntemi de kullanılmıştır. Anten çifti ölçüm yönteminde ekranlı kabin ile birlikte polarizasyon ve yükseklik bakımından birbirine hizalanmış anten çifti kullanılmaktadır. Bu yöntem, kullanılan alttaşların dielektrik katsayılarını belirlemek ve alttaş ile birlikte toplam performansı gözlemleyebilmek için kritik bilgiler sunmaktadır.

Çalışmanın ilerleyen döneminde birkaç katmandan oluşan Metalik Ağ Yapıları çalışmaları gerçekleştirilerek analiz edilecektir. Çok katmanlı Metalik Ağ Yapıları ekranlama etkinliğini önemli miktarda artırsa da kırınım bakımından dezavantajlı görünmektedir. Farklı ağ örüntüleri kullanılarak kırınım performansı da iyileştirilmeye çalışılacaktır. Ağ yapısına sahip metal oksitler gibi hibrit çözümlerin uygulanabilirliği test edilecektir. Bu sayede yöntemlerin avantajlı kısımları öne çıkarılmaya çalışılacaktır. Ayrıca Radar Kesit Alanını düşürmek için geçiş bölgeleri tasarımları detaylandırılacaktır. Son olarak kırınım performansını iyileştirmek için alternatif yöntemler ve metalik örüntü tipleri çalışılacaktır. Bu çalışmada karşılaşılan en büyük sorun malzeme kaynaklı

olmuştur. Elektriksel iletkenliği sahip tüm malzemeler optik bandın belirli bölgelerinde geçirgen özellik göstermemektedir. Geniş bant optik geçirgenliğe sahip tasarım için farklı malzemelerin çalışılması faydalı olmaktadır. Diğer bir sorun ise kullanılan alttaşların dielektrik katsayılarının yüksek olmasıdır. Kalın alttaş kullanımıyla birlikte rezonans frekansı ilgilenilen banda kadar düşebilmektedir. Bunu önlemek için alternatif yöntemlerin çalışılması faydalı olacaktır. Ayrıca farklı malzemeler ile (gümüş dışında) metalik nano kaplamaların performansının analiz edilmesi de değerlendirilebilmektedir.



KAYNAKLAR

- Alfantazi, A.M. ve Moskalyk, R.R. 2003. Processing of indium: A review, *Miner. Eng.*, vol. 16, no. 8, pp. 687–694, 2003, doi: 10.1016/S0892-6875(03)00168-7.
- Ali, A. vd. 2014, Electrohydrodynamic atomization approach to graphene/zinc oxide film fabrication for application in electronic devices, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 25, no. 2, pp. 1097–1104, 2014, doi: 10.1007/s10854-013-1693-1.
- Almeida, B.S.G. ve Leite, V.C. 2019, Particle Swarm Optimization: A Powerful Technique for Solving Engineering Problems, *Swarm Intell. - Recent Adv. New Perspect. Appl.*, pp. 1–21, 2019, doi: 10.5772/intechopen.89633.
- Anonim 2021, <https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction>, Erişim tarihi: Nov. 08, 2021.
- ASTM-D4935 1999, Standard test method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials.
- Badic, M. ve Marinescu, J. 2002, The failure of coaxial TEM cells ASTM standards methods in H.F. range, in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2002, vol. 1, pp. 29–34, doi: 10.1109/isemc.2002.1032442.
- Bender, M. vd. 1999, Deposition of transparent and conducting indium-tin-oxide films by the r.f.-superimposed DC sputtering technology, *Thin Solid Films*, vol. 354, no. 1, pp. 100–105, 1999, doi: 10.1016/S0040-6090(99)00558-1.
- Boland, C.S. vd. 2014, Sensitive, High-Strain, High-Rate Bodily Motion Sensors Based on Graphene-Rubber Composites, *ACS Nano*, vol. 8, no. 9, pp. 8819–8830, 2014, doi: 10.1021/nn503454h.
- Boland, C.S. vd. 2016, Sensitive electromechanical sensors using viscoelastic graphene-polymer nanocomposites, *Science (80-.)*, vol. 354, no. 6317, pp. 1257–1260, 2016, doi: 10.1126/science.aag2879.
- Cairns, D.R. vd. 2000, Strain-dependent electrical resistance of tin-doped indium oxide on polymer substrates, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 11, pp. 1425–1427, 2000, doi: 10.1063/1.126052.
- Callaghan, P. vd. 1991, Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces,” *IEE Proc. H Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 138, no. 5, pp. 448–454, 1991, doi: 10.1049/ip-h-2.1991.0075.
- Catrysse, J. vd. 1992, The Influence of the Test Fixture on Shielding Effectiveness Measurements, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 34, no. 3, pp. 348–351, 1992, doi: 10.1109/15.155853.
- Chen, C. 1970, Transmission Through a Conducting Screen Perforated Periodically with Apertures, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-18, no. 9, pp. 627–632.
- Chen C. 1971, Diffraction of Electromagnetic Waves by a Conducting Screen Perforated Periodically with Circular Holes, *EEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-19, no. 5, pp. 475–481, 1971.

- Cheng, D.K. 1989, *Field and Wave Electromagnetics* Addison Wesley, 1989.
- Clayton, P.R. 2006, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, JOHN WILEY & SONS.
- Coelho, L.D.S. ve Mariani, V.C. 2006, Particle swarm optimization with quasi-newton local search for solving economic dispatch problem, in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2006, vol. 4, no. 3, pp. 3109–3113, doi: 10.1109/ICSMC.2006.384593.
- Colaço, M.J. vd. 2006, Inverse and Optimization Problems in Heat Transfer Helcio R. B. Orlande Inverse and Optimization Problems in Heat Transfer, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 1–24, 2006, doi: 10.1590/ S1678-58782006000100001.
- Dahiya, R.S. 2013, *Robotic Tactile Sensing*, vol. 11, no. 1. Springer, 2013.
- Dahiya, R.S. 2014, Towards flexible and conformable electronics, *Conf. Proc. - 10th Conf. Ph. D. Res. Microelectron. Electron. PRIME 2014*, vol. 19, no. Part IV, pp. 14–15, 2014, doi: 10.1109/prime.2014.6872700.
- Dalkılıç, A. 2014, Analysis and Design of Conformal Frequency Selective,
- DeJong, K.A. 1975, *Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*, The University of Michigan, 1975.
- Durschlag, M.S. ve Detemple, T.A. 1981, Far IR Optical Properties of Free Standing and Dielectrically Backed Metal Meshes, *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 7, pp. 1245–1253.
- Eberhart, R.C. ve Shi, Y. 2000, Comparing nonlinear inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization, *Proc. 2000 Congr. Evol. Comput. (CEC '00)*, vol. 1, pp. 84–88, 2000, doi: 10.1109/ CEC.2000.870279.
- Ederth, J. 2003, *Electrical Transport in Nanoparticle Thin Films of Gold and Indium Tin Oxide*, Uppsala University, 2003.
- Edwards, P.P. vd. 2004, Basic materials physics of transparent conducting oxides, *Dalt. Trans.*, no. 19, pp. 2995–3002, 2004, doi: 10.1039/b408864f.
- Elfallal, I. vd. 1993, Formulation of a statistical thermodynamic model for the electron concentration in heavily doped metal oxide semiconductors applied to the tin-doped indium oxide system, *Thin Solid Films*, vol. 223, no. 2, pp. 303–310, 1993, doi: 10.1016/0040-6090(93)90537-Y.
- Floquet, M.G. 1883, Sur les equations differentielles lineaires a coefficients periodiques, *An. Ec. Norm. Super.*, vol. 12, pp. 47–88, 1883, doi: 10.1007/bfb0070154.
- Gall, D. 2016, Electron mean free path in elemental metals, *J. Appl. Phys.*, vol. 119, no. 8, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1063/1.4942216.
- Gaskill, J.D. 1978, *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics*, vol. 69, no. 4. JOHN WILEY & SONS.
- Genovesi, S. vd. 2006, Particle swarm optimization for the design of trusses, *IEEE*

- Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 277–279, 2006, doi: 10.1061/40700(2004)160
- Ghodgaonkar, D.K. vd. 1990, Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 39, no. 2, pp. 387–394, 1990, doi: 10.1109/19.52520
- Ghosh, D. S. vd. 2009, Widely transparent electrodes based on ultrathin metals, *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 325–327
- Goldberg, D.E. 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC*, vol. 22. Addison-Wesley, 1989.
- Goldberg, D.E. ve Deb, K. 1991, *A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms*, vol. 1. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- Goodman, J.W. 2005, *Introduction to Fourier optics*
- Graf, W. ve Vance, E.F. 1988, Shielding Effectiveness and Electromagnetic Protection, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 30, no. 3, pp. 289–293, 1988, doi: 10.1109/15.3307.
- Green, M.A. 2009, Estimates of Te and In Prices from Direct Mining of Known Ores, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 17, pp. 347–359, 2009, doi: 10.1002/pip.899.
- Greene J.E. 2010, *Thin Film Nucleation, Growth and Microstructural Evolution : An Atomic Scale View*, Third Edit. Elsevier Ltd., 2010.
- Gupta, L. vd. 1989, Band gap narrowing and the band structure of tin-doped indium oxide films, *Thin Solid Films*, vol. 176, no. 1, pp. 33–44, 1989, doi: 10.1016/0040-6090(89)90361-1.
- Günay, İ. vd. 2021, Comparison of Basic Frequency Selective Surface Design Methods for Optical Windows, *IEEE Access*, vol. 9, no. 2, pp. 129855–129862, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3112885.
- Günay, İ. vd. 2022, Empedans Uyumlandırması Güçlendirilen bir Elektromanyetik Girişim Izgarası, Türk Patent Enstitüsü, 2022.
- Han, Y.vd. 2017, High-performance hierarchical graphene/metal-mesh film for optically transparent electromagnetic interference shielding, *Carbon N. Y.*, vol. 115, pp. 34–42, 2017, doi: 10.1016/j.carbon.2016.12.092.
- Han, K.H.ve Kim, J.H. 2002, Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 6, pp. 580–593, 2002, doi: 10.1109/TEVC.2002.804320.
- Hansen, R.C. ve Pawlewicz W.T. 1982, Effective Conductivity and Microwave Reflectivity of Thin Metallic Films, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 30, no. November, pp. 2064–2066.
- Harris, D.C. 1999, *Materials for Infrared Windows and Domes_ Properties and Performance*. SPIE Press, 1999.

- Haupt, R.L. ve Haupt, S.E. 2004, *Practical Genetic Algorithms*. JOHN WILEY & SONS, 2004.
- Hayt, W.H.J. ve Buck, J.A. 2017, *Engineering Electromagnetics*, 9th Edition.
- Hecht, D.S. vd. 2011, Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes , Graphene , and Metallic Nanostructures, *Adv. Mater.*, vol. 23, pp. 1482–1513, 2011, doi: 10.1002/adma.201003188.
- Holland, J.H. 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The MIT Press,
- Hong, S.K. vd. 2012, Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer graphene, *Nanotechnology*, vol. 23, no. 45, 455704, pp. 1–5, 2012, doi: 10.1088/0957-4484/23/45/455704.
- IEEE 299 2006, IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures.
- Jacoby, K.T. vd. 2009, Predicted and measured EMI shielding effectiveness of a metallic mesh coating on a sapphire window over a broad frequency range, *Proc. SPIE7302, Window and Dome Technologies and Materials XI, 73020X* (27 April2009); doi: 10.1117/12.818200
- Ke, Y. vd. 2009, Resistivity of thin Cu films with surface roughness, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 79, no. 15, pp. 1–6, 2009, doi: 10.1103/PhysRevB.79.155406.
- Kennedy, J. ve Eberhart, R. 1995, Particle Swarm Optimisation, *Proc. ICNN'95 - Int. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- Khan, S. vd. 2011, Direct patterning and electrospray deposition through EHD for fabrication of printed thin film transistors, *Curr. Appl. Phys.*, vol. 11, no. 1 SUPPL., pp. S271–S279, 2011, doi: 10.1016/j.cap.2010.11.044.
- Kohin M. vd. 1993, Analysis and design of transparent conductive coatings and filters, *Opt. Eng. Sci.*, vol. 32, no. May, pp. 911–925, 1993, doi: 10.1002/9781119302773.ch10.
- Kurmer, J.P. vd. 1990, Polarization Effects of Resonant Mesh Structures Fabricated on IR Transmitting Windows, *Proc. SPIESPIE*, vol. 1326, no. 1326, pp. 165–175, 1990, doi: 10.1117/12.22496.
- Lee, Y.M. 1998, Comparison of SE measurements between MIL-STD-285 and the ASTM Standard E1851, *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, vol. 2, pp. 1053–1058, 1998, doi: 10.1109/isemc.1998.750354.
- Li J. ve Kim, K. 2007, Percolation threshold of conducting polymer composites containing 3D randomly distributed graphite nanoplatelets, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 10, pp. 2114–2120, 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.11.010.
- Liu, Y. ve Tan, J. 2013, Frequency Dependent Model Of Sheet Resistance And Effect Analysis On Shielding Effectiveness Of Transparent Conductive Mesh Coatings, *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 140, no. May, pp. 353–368, 2013.

- Luebbers, R.J. ve Munk, B.A. 1978, Some Effects of Dielectric Loading on Periodic Slot Arrays, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 26, no. 4, pp. 536–542, 1978, doi: 10.1109/TAP.1978.1141887.
- Luo, X. 2006, Design and optimization of Frequency Selective Surfaces (FSS), Nanyang Technological University, 2006.
- Luo, S. ve Liu, T. 2014, Graphite nanoplatelet enabled embeddable fiber sensor for in situ curing monitoring and structural health monitoring of polymeric composites, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 6, no. 12, pp. 9314–9320, 2014, doi: 10.1021/am5017039.
- Marconi, G. ve Franklin C.S. 1914, Reflector for use in wireless telegraphy and telephony, 279410.
- Marcuvitz, N. 1986, *Waveguide Handbook*
- MIL-STD-285 1956, Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes.
- Moonen, P.F. vd. 2012, Fabrication of transistors on flexible substrates: From mass-printing to high-resolution alternative lithography strategies, *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 41, pp. 5526–5541, 2012, doi: 10.1002/adma.201202949.
- Moučka, R. vd. 2019, Accurate Measurement of the True Plane-Wave Shielding Effectiveness of Thick Polymer Composite Materials via Rectangular Waveguides, 2019, doi: 10.3390/polym11101603.
- Munk, B.A. 1968, United States Patent (19), 768142, 1968.
- Munk, B.A. 2000, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. 2000.
- Nair, R.R. vd. 2008, Fine structure constant defines visual transparency of graphene, *Science (80-.)*, vol. 320, no. 5881, p. 1308, 2008, doi: 10.1126/science.1156965.
- Nathan B.A. vd. 2012, Flexible electronics: The next ubiquitous platform, *Proc. IEEE*, vol. 100, pp. 1486–1517, 2012.
- Ott, H.W. 1988 *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, 2nd Editio. JOHN WILEY & SONS.
- Ott, H.W. 2009, *Electromagnetic compatibility engineering*. JOHN WILEY & SONS.
- Pease, R.F. 2008, Lithography and other patterning techniques for future electronics, *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 248–270, 2008.
- Radha, B. vd. 2013, Metal hierarchical patterning by direct nanoimprint lithography, *Sci. Rep.*, vol. 3, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1038/srep01078.
- Ram, R. vd. 2017, Determination of percolation threshold and electrical conductivity of polyvinylidene fluoride (PVDF)/short carbon fiber (SCF) composites: effect of SCF aspect ratio,” *Polym. Int.*, vol. 66, no. 4, pp. 573–582, 2017, doi: 10.1002/pi.5294

- Saglam, Ö. 2009, Design , Fabrication and Measurement of Hybrid Frequency Selective Surface (Fss) Radomes, no. July, p. 100, 2009. Available: <http://www.thesis.bilkent.edu.tr/0003836.pdf>
- Saksena vd. 1969, Reflection and transmission characteristics of wire gratings in the far infrared, *Infrared Phys.*, vol. 9, no. 2, pp. 43–52, 1969, doi: 10.1016/0020-0891(69)90010-4.
- Santagiuliana, G. 2019, Preparation, characterisation, and modelling of graphene-based polymer nanocomposites with enhanced mechanical and electrical properties, University of London, 2019.
- Sarto M.S. ve Tamburrano A. 2006, Innovative test method for the shielding effectiveness measurement of conductive thin films in a wide frequency range, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 2, pp. 331–341, 2006, doi: 10.1109/TEMPC.2006.874664.
- Schelkunoff, S.A. 1943, *Electromagnetic Waves*.
- Shi, Y. ve Eberhart, R.C. 1999, Empirical study of particle swarm optimization, *Proc. 1999 Congr. Evol. Comput. CEC 1999*, vol. 3, pp. 1945–1950, 1999, doi: 10.1109/CEC.1999.785511.
- Sierros, K.A. vd. 2009, Dry and wet sliding wear of ITO-coated PET components used in flexible optoelectronic applications, *Wear*, vol. 267, no. 1–4, pp. 625–631, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.WEAR.2008.12.042.
- Singh, M. vd. 2010, Inkjet printing-process and its applications, *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 673–685, 2010, doi: 10.1002/adma.200901141.
- Sondheimer, E.H. 1952, *The mean free path of electrons in metals*, vol. 1, no. 1.
- Soukup, R. vd. 2012, Organic based sensors: Novel screen printing technique for sensing layers deposition, *Proc. Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, pp. 19–24, 2012, doi: 10.1109/ISSE.2012.6273101.
- Søndergaard, P.R. vd. 2013, Roll-to-Roll fabrication of large area functional organic materials, *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 51, no. 1, pp. 16–34, 2013, doi: 10.1002/polb.23192.
- Tamburrano, A. ve Sarto, M.S. 2004, Electromagnetic Characterization of Innovative Shielding Materials in the Frequency Range Up To 8 Gigahertz, *Proc. IEEE Int. Symp. EMC , CA, Aug. 9–13*, vol. 2, pp. 551–556, 2004.
- Tolcin, A.Y. 2010, 2008 Minerals Yearbook,” *USGS*, no. October, pp. 35.1-35.8, 2010, . Available: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/country/2008/myb3-2008-pp.pdf>.
- Ulrich, R. 1967, Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure, *Infrared Physics*, vol. 7, no. 1. pp. 37–55, 1967, doi: 10.1016/0020-0891(67)90028-0.

- Vasquez, H. vd. 2009, Simple Device for Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness Measurement, 2009.
- Wang, L.L. vd. 2009, Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon-based materials prepared by screen printing, *Carbon N. Y.*, vol. 47, no. 8, pp. 1905–1910, 2009, doi: 10.1016/j.carbon.2009.03.033.
- Weile, D.S. ve Michielssen, E. 1997, Genetic Algorithm Optimization Applied to Electromagnetics: A review, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 45, no. 3, pp. 343–353, 1997, doi: 10.1109/8.558650.
- Werlé, M.D. vd. 2006, Tarnishing resistance of silver-palladium thin films, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 200, no. 24, pp. 6696–6701, 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.10.020
- Whitbourn, L.B. ve Compton R.C. 1985, Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary,” *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 2, p. 217, doi: 10.1364/ao.24.000217.
- Wilson, P.F. ve Ma, M.T. 1988, Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials: Part II—Near Field Source Simulation, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 30, no. 3, pp. 251–259, 1988, doi: 10.1109/15.3303.
- Yan, H. vd. 2009, A high-mobility electron-transporting polymer for printed transistors, *Nature*, vol. 457, no. 7230, pp. 679–686, 2009, doi: 10.1038/nature07727.
- Yelboğa, T. 2012, Fabrication and Characterization of Inp Based Quantum Well Infrared Detector Arrays, Hacettepe University, 2012.
- Yang, Z. vd. 2008, Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multilayer Metallic Thin Film on Plastic Substrates, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 110, no. July, pp. 1403–1410, 2008, doi: 10.1002/app.
- Zhang, B. vd. 2012, Particle swarm optimization of frequency selective surface, in *2012 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference Particle*, 2012, pp. 195–198, doi: 10.1109/CSQRWC.2012.6294988.